



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**“EVOLUCIÓN DE UNA
APLICACIÓN INFORMÁTICA
PARA EL ANÁLISIS Y
SIMULACIÓN DE VIBRACIONES.
ADEVI3.1”**

Autora:

Daniela Vicario Tomaselli

Director:

Higinio Rubio Alonso

JULIO 2007

Gracias a mis padres porque aún cuando me encontraba sin fuerzas para continuar, ellos han estado allí animándome y apoyándome en todo, incluso en cosas que no les hacía mucha gracia. Gracias por darme la libertad para tomar mi camino, dando vuestra opinión, pero sin imponerla. También a mi hermana, por estar ahí, por hacerme rabiar y por decirme su opinión aunque no la quisiera escuchar y gracias por escucharme en los momentos que más lo necesitaba.

Gracias Luis por animarme a continuar a luchar y por estar ahí, te quiero.

Gracias Cristina por soportar todas mis dudas y obsesiones.

Gracias David por estar ahí siempre que lo he necesitado, cuento y contaré siempre contigo.

Gracias Inés, por todo, has hecho mucho por mí.

Gracias Vicky por ser como eres, eres genial.

Gracias Carlos porque has aparecido en los momentos claves de mi vida y has sido una gran ayuda.

Gracias Andrés por estar siempre disponible para echarme una mano con el ordenador y con lo que haga falta y por contar conmigo en tus planes.

Gracias Paula y, a ti también, Jorge, por todos los momentos compartidos, han sido geniales y espero que lo sigan siendo.

Gracias Chivite, Edu, Pasku y Chema porque cuando os conocí fue un cambio a mejor en mi vida, recordé cosas que había olvidado, disfrutar del momento. CARPE DIEM.

Gracias a mis amigas de toda la vida Paz, Dedes y Teresa, sois una parte importante en mi vida.

Gracias Mariajo por tratarnos como a reyes en tu pueblo, ¡VIVA NOBLEJAS!

Gracias Pili, Marcos, Eleder, Emilio, Ruth, Charlie, Luci, Pablo, por hacer más entretenida y llevadera la vida en la universidad y también fuera de ella.

Gracias Kai y Nacho por hacerme sentir que soy útil en ISF.

Estos años en la universidad han sido muy importantes para mí, he adquirido conocimientos, pero sobretudo he conocido a mucha gente, gente que ha pasado por mi vida, pero que no se ha quedado y otra gente que sí ha permanecido a mi lado. Quería dar las gracias a todos ellos porque he aprendido cosas con y de ellos.

¡¡GRACIAS A TODOS!!

ÍNDICE



ÍNDICE

ÍNDICE

Capítulo I: INTRODUCCIÓN	11
1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	13
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	22
3. FASES DEL PROYECTO	23
4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	25
Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
1. ANÁLISIS DE SEÑALES	29
1.1. Análisis vibratorio. Dominio temporal y frecuencial	29
1.2. Transformada de Fourier (FT)	31
1.3. La Short Time Fourier Transform (STFT)	39
1.4. Espectrograma	46
1.5. Análisis mediante técnicas de estadística descriptiva	50
2. ANÁLISIS DE SEÑALES UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET	60
2.1. Aspectos básicos de la transformada Wavelet	60
2.2. La transformada Wavelet	61
2.3. Relación entre escala y frecuencia	66
2.4. Tipos de transformada Wavelet	70
2.5. Aplicaciones de la transformada Wavelet	72
2.6. Clasificación y tipos de Wavelets	74
3. DEFECTOLOGÍA EN MÁQUINAS	87
3.1. Desequilibrio	88



ÍNDICE

3.2. Desalineamiento de ejes	90
3.3. Engranajes	93
3.4. Rodamientos	95
3.4.1. Tipos de rodamientos	97
3.4.1.1. Clasificación de los rodamientos según la carga que transmiten	97
3.4.1.2. Clasificación de los rodamientos según sus elementos rodantes	101
3.4.2. Tipos de daños en rodamientos	116
3.4.2.1. Desgaste	116
3.4.2.2. Muecas	119
3.4.2.3. Adherencias	121
3.4.2.4. Fatiga superficial	126
3.4.2.5. Corrosión	127
3.4.2.6. Avería producida por paso de corriente eléctrica	129
3.4.2.7. Desconchado o descascarillado	131
3.4.2.8. Grietas	137
3.4.2.9. Averías de la jaula	140
3.4.3. Fases de rotura de rodamientos	142
3.4.4. Fases de fallo en los rodamientos	143
3.5 Tablas resumen	150
Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN	153
1. INTRODUCCIÓN	155
2. CARACTERÍSTICAS DEL MATLAB 7.0	156
3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA	158
3.1. Explicación de la pantalla, zonas y objetos	159
3.2. Funcionamiento del módulo GUIDE. Creación del modo interactivo para usuarios del programa	161



ÍNDICE

4. DEFINICIONES	169
4.1. Handles	169
4.2. Callback	169
4.3. Funciones	170
5. ESTRUCTURA DE FICHEROS	172
5.1. Ficheros “.m”	172
5.2. Ficheros “.fig”	173
5.3. Diagramas	173
5.3.1. Diagrama para la versión en castellano	174
5.3.2. Diagramas de la versión en inglés	182
6. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	189
6.1. ADEVI3.1 en castellano	191
6.1.1. Portada	191
6.1.2. Inicio	193
6.1.3. Análisis de vibraciones	194
6.1.4. Question	199
6.1.5. Resultados	201
6.1.6. Estadística	203
6.1.7. Gráfica	209
6.1.8. Stempplot1	213
6.1.9. Evolplot1	214
6.1.10. Psdplot1	215
6.1.11. Especevolplot1	216
6.1.12. Specgramplot1	216
6.1.13. Examinar3	217



ÍNDICE

6.1.14. Escala	218
6.1.15. Wavelet	221
6.1.16. Daubechies	224
6.1.17. Symlet	227
6.1.18. Coiflet	230
6.1.19. Biortogonal	232
6.1.20. Simulación de vibraciones en rodamientos	236
6.1.21. Anillo exterior	238
6.1.22. Información sobre anillo exterior	250
6.1.23. Anillo interior	254
6.1.24. Información sobre anillo interior	264
6.1.25. Elemento rodante	268
6.1.26. Información sobre elemento rodante	278
6.2. ADEVI3.1 en inglés	282
Capítulo IV: MANUAL DEL USUARIO	283
1. DESCRIPCIÓN GENERAL	285
2. REQUERIMIENTOS BÁSICOS	286
3. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN	287
3.1. ADEVI3.1 en castellano	287
3.1.1. Portadainicio	287
3.1.2. Portada	288
3.1.3. Análisis de vibraciones	289
3.1.4. Simulación de vibraciones en rodamientos	307
3.2. ADEVI3.1 en ingles	319
3.2.1. Title page, start	319



ÍNDICE

3.2.2. Title page	320
3.2.3. Vibrations analysis	320
3.2.4. Simulation of vibrations in rolling bearings	337
Capítulo V: RESULTADOS	349
1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEDIANTE UN FICHERO DE DATOS	352
2. TRANSFORMADA WAVELET	361
2.1. Daubechies	361
2.2. Morlet	366
2.3. Mexican Hat	367
2.4. Meyer	367
2.5. Symlet	368
2.6. Coiflet	372
2.7. Biortogonal	374
3. SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS	382
3.1. Defecto en anillo exterior	383
3.1.1. Resultados gráficos	384
3.1.2. Resultados estadísticos	385
3.1.3. Gráficos	386
3.1.4. Transformada Wavelet	387
3.2. Defecto en anillo interior	389
3.2.1. Resultados gráficos	390
3.2.2. Resultados estadísticos	391
3.2.3. Gráficos	392
3.2.4. Transformada de Wavelet	393
3.3. Defecto en elemento rodante	395



ÍNDICE

3.3.1. Resultados gráficos	396
3.3.2. Resultados estadísticos	397
3.3.3. Gráficos	398
3.3.4. Transformada Wavelet	399
Capítulo VI: JUEGOS DE PRUEBAS	401
1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES	404
1.1. Análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en anillo exterior	404
1.1.1. Resultados estadísticos	404
1.1.2. Gráficos	405
1.1.3. Transformada Wavelet	408
1.2. Análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en anillo interior	409
1.2.1. Resultados estadísticos	410
1.2.2. Gráficos	411
1.2.3. Transformada Wavelet	413
1.3. Análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en elemento rodante	415
1.3.1. Resultados estadísticos	415
1.3.2. Gráficos	416
1.3.3. Transformada Wavelet	419
2. SIMULACIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS	421
2.1. Simulación de defecto en anillo exterior	421
2.1.1. Resultados gráficos	421
2.1.2. Resultados estadísticos	422
2.1.3. Gráficos	423
2.1.4. Transformada Wavelet	425
2.2. Simulación de defecto en anillo interior	426



ÍNDICE

2.2.1. Resultados gráficos	426
2.2.2. Resultados estadísticos	427
2.2.3. Gráficos	428
2.2.4. Transformada Wavelet	430
2.3. Simulación de defecto en elemento rodante	431
2.3.1. Resultados gráficos	431
2.3.2. Resultados estadísticos	432
2.3.3. Gráficos	433
2.3.4. Transformada Wavelet	435
Capítulo VII: CONCLUSIONES	437
1. APORTACIONES DEL PROYECTO	439
2. NUEVAS LÍNEAS DE DESARROLLO	441
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	443

Capítulo I:

INTRODUCCIÓN



I. INTRODUCCIÓN

1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El mantenimiento de la maquinaria es una de las principales preocupaciones o problemas de las empresas industriales.

Se entiende por mantenimiento el conjunto de tareas que va a permitir que las máquinas que se integran en una empresa funcionen de manera estable y eficaz, en el sentido de no incurrir en gastos innecesarios y conseguir una buena calidad de los productos finales sin retrasos o demoras.

Dentro de esa problemática se enmarca el presente proyecto que no pretende llegar a una solución global del mantenimiento, aunque sí a una particular en un caso crucial del mismo, en concreto, el mantenimiento de los rodamientos, componentes esenciales de cualquier máquina.

Si esta solución se demostrara útil podría extenderse, con ciertos retoques, a los otros elementos de la máquina.

Para alcanzar esa solución se van a utilizar dos técnicas importantes y actuales:

- Análisis de vibraciones.
- Simulación de defectos.

y para que la solución sea práctica y factible se hará apoyándose en la Informática.

De una manera breve se van a comentar estos tres conceptos sobre los que bascula el proyecto.

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El **análisis de vibraciones** de maquinaria es una de las metodologías ampliamente usadas en el mantenimiento de maquinaria, de tal manera que se ha convertido en algo esencial para el estudiante de ingeniería mecánica ya que le permite comprender, analizar y proponer soluciones sobre la diversa problemática relacionada con procesos industriales.

Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son: el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales y ruidos molestos en el ambiente laboral.



Capítulo I: INTRODUCCIÓN

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina es determinar las medidas necesarias para corregir las condiciones de vibración, reduciendo el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes en la vibración detectadas en el elemento o máquina, la determinación de sus causas y la corrección del problema que ello representa.

Existen diferentes causas de vibración por lo que resulta primordial conocer los tipos de vibraciones, y sus respectivas consecuencias, para interpretar los datos que se obtienen, determinar el tipo de vibración que se presenta y buscar la oportuna corrección de las mismas.

Hoy en día, uno de los puntos importantes a considerar en el buen funcionamiento de los procesos industriales está basado, entre otras cosas, en reglas, procedimientos o metodologías de mantenimiento.

A continuación se enumeran los tipos de metodología de mantenimiento, explicando, con algún detalle, el más directamente relacionado con el elegido para el proyecto.

- **Mantenimiento tras Fallo o correctivo:**

Se realiza sólo cuando un fallo viene a interrumpir el servicio.

- **Mantenimiento Preventivo (o Asintomático):**

Se analiza cada máquina y se programan intervenciones periódicas antes de que ocurran los problemas, es decir, en tiempos inferiores a los que estadísticamente podrían fallar.

- **Mantenimiento Predictivo (o Sintomático):**

Basado en un análisis detallado del estado o condición de operación de las máquinas controladas para detectar un fallo antes de que suceda.

- **Mantenimiento Proactivo:**

La última innovación en el campo del mantenimiento predictivo es el mantenimiento proactivo, que usa gran cantidad de técnicas para alargar la disponibilidad de las máquinas. La idea principal de un mantenimiento proactivo es el análisis de las causas fundamentales de los fallos en las máquinas. Estas causas se pueden remediar y los mecanismos de fallo se pueden eliminar gradualmente en cada máquina, mejorando su funcionamiento.



Capítulo I: INTRODUCCIÓN

Se ha sabido, desde hace mucho tiempo, que el desequilibrio y la desalineación son las causas fundamentales de la mayoría de los fallos en máquinas. Ambos fenómenos provocan una carga en los rodamientos con fuerzas indebidas y acortan su vida útil. En lugar de reemplazar continuamente rodamientos gastados en una máquina que presenta fallos, una mejor política sería la de llevar a cabo un balanceo y alineamiento de precisión en la máquina, y verificar los resultados por medio de un análisis de vibraciones.

Existen diversas técnicas para aplicar un análisis de vibraciones, tales como: en fase, frecuencia y tiempo. Pero la dificultad que tienen estas técnicas es que necesita realizar muchas medidas, por lo que se manejan un volumen de datos importantes y exigen cálculos complejos. Para poder abordar esta tarea, lo mejor es recurrir a la informática: reduce el tiempo empleado en el cálculo de datos y en la obtención de resultados, evitando posibles errores de cálculo. Por este motivo, se ha decidido que el proyecto tratara sobre vibraciones mecánicas pero desde la informática.

INFORMÁTICA

La **informática** ha irrumpido en las sociedades contemporáneas con gran fuerza, extendiéndose por todos sus ámbitos: familiares, empresariales, gubernamentales, científicos, educativos, sectores primarios (agricultura, ganadería, pesca), servicios (transporte, turismo, espectáculos, sanidad),...

Quizás no tengamos aún perspectiva suficiente para apreciar la importancia de este fenómeno y su influencia en los cambios profundos que las sociedades actuales están experimentando.

Hay tres aspectos que la configuran como herramienta o factor tan decisivo en el desarrollo cultural, económico y científico.

Estos tres aspectos serían:

- Procesamiento de información.
- Comunicación.
- Aplicaciones prácticas.



Veamos, brevemente, en qué se concreta cada uno de ellos:

a) Procesamiento de información

El tratamiento de la información comprende:

- Entrada o captura de datos.
- Almacenamiento o archivo de esos datos de forma que garantice un acceso rápido y fiable, y la permanencia de la integridad del dato, es decir, que no se deteriore en cuanto a que se modifique o se pierda parte del dato originario.
- El procesamiento propiamente dicho de la información, mediante fórmulas científicas, operaciones lógicas, combinaciones de distintos datos. Todo ello, con una rapidez y precisión que ningún otro tipo de máquina o criatura puede lograr.
- Elaboración de productos finales que pueden adoptar multitud de formas:
 - Resultados de cálculos científicos complejos.
 - Gráficas, diseños, imágenes (retrato robot,...).
 - Informes descriptivos, predictivos, diagnósticos,...

Y todo ello con cualquier tipo de dato:

- Alfabético, numérico, otros símbolos.
- Gráficas, figuras.
- Funciones matemáticas.
- Vídeos, sonidos (voz, ruidos,...).

habiendo demostrado una óptima adaptabilidad a muy variados entornos.

b) Comunicación

La informática permite utilizar una gran variedad de soportes que facilitan que la información sea transmitida con una rapidez sorprendente e inigualable por cualquier otro medio.

Ello se ha hecho notar en campos tan dispares como la navegación espacial, satélites artificiales, operaciones quirúrgicas muy complejas, guerras, terrorismo,...

Mención especial hay que hacer al fenómeno de Internet que ha ampliado las facilidades de comunicación de manera espectacular. Se han multiplicado las redes que se apoyan en Internet para establecer un sistema de comunicación interno a una organización rápido y seguro, aunque complejo. Un ejemplo cercano lo constituye el sistema que aplica la Universidad Carlos III para interconectar todo su organigrama y utilizar los distintos servicios administrativos y académicos.

Lo que da especificidad a la comunicación informática es:

- Rapidez de ejecución.
- Versatilidad por la gran variedad de datos que puede manejar.
- Seguridad, desde una doble perspectiva.
- Encriptación de datos para que no se entienda la información por quien carezca del código de encriptación.
- Controles de acceso, impidiendo el acceso a quien no disponga de una contraseña válida.

c) Aplicaciones prácticas

Son innumerables, por citar algunas:

- Regulación tráfico.
- Billetes de entrada a museos, metro,...
- Medicina: historial médico, operaciones quirúrgicas,...
- Transporte: automatismo de la conducción, de la climatización del vehículo.
- Meteorología: captación de señales del satélite, predicción del tiempo.

Cabe destacar su utilización en la docencia, su uso se ha extendido y seguirá incrementándose en todos los niveles de enseñanza: preescolar, primaria, secundaria y universitaria.

Es aplicable a cualquier materia: lengua, geografía, historia, ciencias exactas, ciencias sociales.

A modo de ejemplos de las ventajas que ofrece, se van a examinar tres casos.

Una de las herramientas básicas de la docencia es la pizarra. En ella hay una transmisión de conocimientos por el profesor a los discípulos gracias a un discurso lógico que hace el profesor.

Partiendo de un conocimiento inicial común, se van desplegando sucesivas fases lógicas apoyadas en los signos, figuras que se van reflejando en la pizarra complementados con la explicación oral del profesor.

Esta captación de saber se produce por la participación activa tanto del profesor como de los alumnos en un itinerario lógico que va a proporcionar a estos últimos un nuevo conocimiento y un entendimiento de dónde éste se origina y cómo se llega hasta él.

Pues bien, la pantalla del ordenador puede perfectamente sustituir a la pizarra. Sobre dicha pantalla puede ir desplegándose el discurso lógico utilizando, esta vez, una letra más inteligible y unas figuras más perfectas incluso idénticas a las reales y dinámicas, vivas, es decir, que se las podrá contemplar desde distintos ángulos, secciones, alejar, acercar, resaltar sus distintos componentes mediante colores o tramas, enlazar con pantallas (pizarras) complementarias que aclaren los puntos más complejos y, finalmente, conservar toda la explicación mediante unas sencillas pulsaciones de ratón, es decir, sin necesidad de distraer la atención del discurso lógico por mor de una copia frenética de lo transcrito en la pizarra.



Figura 1.1. Uso de aulas informáticas en la docencia.



Capítulo I: INTRODUCCIÓN

El siguiente ejemplo se refiere a que en lugar de visitar una fábrica o asistir directamente a una operación quirúrgica lo que presenta ciertas dificultades, se pueden realizar visitas virtuales, con mayor rigor, minuciosidad y precisión que las reales por la potencialidad de que goza la Informática.

Finalmente, cuando se quiere conocer cómo se comporta un producto – coche, tejido, bombilla,...- en la realidad, se hacen unas pruebas que, según los casos, pueden resultar difíciles, costosas o peligrosas para las personas. Con la Informática, se pueden obviar, total o en gran parte, esos inconvenientes, diseñando aplicaciones informáticas que permitan conocer cómo reaccionará el producto sometido a la simulación ante cambios en las condiciones de alguno de sus elementos esenciales o del entorno. De este modo, se puede saber cómo varía la potencia de frenado de un vehículo ante circunstancias cambiantes o cómo se deforma su estructura si sufre un choque frontal, lateral, trasero, con distintos ángulo y variando su velocidad.

DEFECTOS EN MÁQUINAS

Una máquina conviene que trabaje en condiciones óptimas, o al menos, aceptables pues de no ser así, ello incidirá en:

- Riesgos para la seguridad de los operarios de la máquina.
- Deterioro de la calidad del producto fabricado.
- Mayor desgaste de algunos componentes de la máquina.
- Menor duración o vida útil de la máquina.
- Menor o nula rentabilidad. Se producirán más averías y, probablemente, su reparación sea cada vez más lenta, costosa y complicada o incluso incapacitarla para lograr de nuevo un funcionamiento aceptable.
- Daños en el sistema que no habrían ocurrido de haberse evitado que la máquina opere en condiciones de riesgo.

Por consiguiente, es muy importante conocer los posibles riesgos (defectos) que pueden presentarse en los componentes críticos (esenciales) de la máquina y evitar que aparezcan mediante la sustitución anticipada del elemento que está ya cercano al fallo.

No obstante, es muy posible que no se consigan evitar los fallos completamente, por lo que hay que plantearse, en el supuesto de fallo, que su detección se produzca lo antes posible, para evitar ulteriores daños y costes, y reemplazar la pieza de inmediato.

Uno de los componentes más críticos de la máquina es el rodamiento y su buen funcionamiento es vital para que no se den los problemas señalados antes.

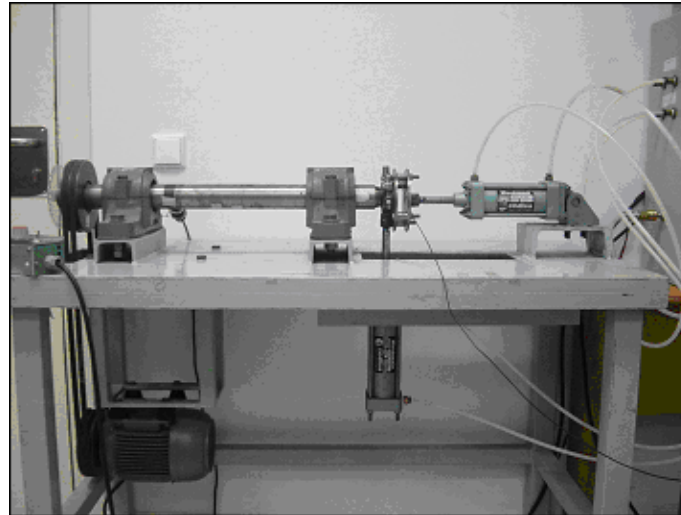


Figura 1.2. Máquina de ensayo de rodamientos

Teniendo en cuenta lo expuesto hasta aquí, se ha querido, con este proyecto, abarcar los tres importantes campos ya descritos: Análisis de vibraciones, simulación de defectos en máquina y su materialización en un programa informático.

Tomando como punto de partida un proyecto anterior en el que se había buscado algo similar y creado una aplicación informática denominada ADEVI 2.0, se ha reestructurado la misma, consiguiendo una versión más actual y potente, enriqueciendo el análisis con las Transformadas de Wavelet y la de Hilbert, y elaborando unas rutinas interactivas más potentes y rápidas, pero, al mismo tiempo, más sencillas para el usuario.

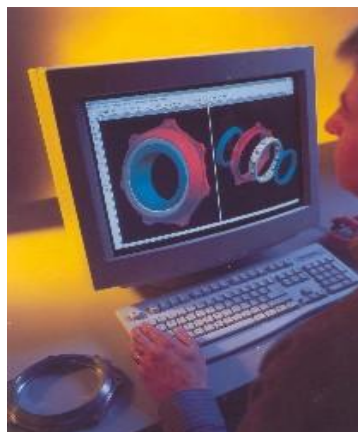


Figura 1.3. Aplicación informática de rodamientos.



Capítulo I: INTRODUCCIÓN

Por otro lado, se han ampliado los tipos de resultados obtenidos y la aplicación se ha realizado también en versión inglesa, lo que aumenta su capacidad docente.

La aplicación informática ADEVI 3.1 se desdobra en dos:

- **Análisis de vibraciones** donde se encuentran los principales métodos de procesamiento de la señal: resultados estadísticos y gráficos (señal temporal, envolvente,...).
- **Simulación de las señales vibratorias** generadas por un rodamiento con algún componente deteriorado (pista interior, exterior y elemento rodante).

La principal novedad en esta aplicación es que el análisis de vibraciones se ha ampliado introduciendo en los gráficos el espectrograma, técnica que analiza la variación de frecuencia en una señal en función del tiempo.

Otra novedad importante. En simulación de vibraciones se ha incorporado la posibilidad de la existencia de ruido aleatorio y defectos distribuidos. Además, se ha introducido en la simulación de señales vibratorias la posibilidad de guardar los datos obtenidos y poder realizar los mismos métodos de procesamiento de la señal que se hace en el análisis de vibraciones.



2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal ha sido obtener una aplicación informática más evolucionada que las ya existentes; la primera versión se llamó ADEVI, programado en MATLAB 6.0, y la sucesiva fue ADEVI2.0, programado en MATLAB 7.0. Para ello, se han ampliado las anteriores versiones añadiendo nuevas técnicas de análisis de vibraciones y nuevos programas que logren una mayor flexibilidad, velocidad e interacción del usuario con los resultados. A esta nueva aplicación se la ha llamado ADEVI3.1.

Para conseguir esto, ha sido necesario profundizar en el conocimiento técnico sobre los principales métodos de análisis vibratorio de la señal en el dominio frecuencial y/o temporal, en especial, el espectro tempo-frecuencial, el estudio de la transformada Wavelet, recopilación de los defectos más importantes producidos en máquinas convencionales, así como sus representaciones espectrales, familiarización con los rodamientos, parámetros, tipos,...

Ha sido preciso usar la programación en MATLAB 7.0, y más concretamente el módulo GUIDE, el cual permite la creación de un interfaz gráfico específico para las necesidades concretas que requería esta aplicación para el análisis y simulación de señales vibratorias.

Asimismo, ha sido necesario estudiar y comprender todas las instrucciones que conforman el programa ADEVI2.0. De este modo, se ha podido elaborar una nueva estructuración, como, por ejemplo, la creación de nuevos enlaces para la generación de nuevos análisis en simulación de señales vibratorias.

Por supuesto, al introducir nuevos programas para que la aplicación anterior incorporara nuevas técnicas de análisis se han tenido que realizar las pertinentes modificaciones para poder integrar armónicamente los nuevos programas y depurar la aplicación, para conseguir una mayor velocidad en la obtención de resultados.

Otra tarea que ha habido que abordar ha sido la de depurar y actualizar los diagramas, pues los anteriores se habían quedado obsoletos.

Una última novedad que conviene destacar consiste en la traducción al inglés de esta aplicación, para que puedan acceder a ella un mayor número de personas.



3. FASES DEL PROYECTO

Para poder lograr todos lo expuesto en el apartado anterior, ha sido necesario seguir unos pasos indispensables en la ejecución del proyecto.

En primer lugar, se inició el proceso de recopilación de documentación en el tema de las vibraciones mecánicas, rodamientos y en el programa MATLAB 7.0, para ello he acudido a libros, Internet y a contactar expertos en estas cuestiones.

Una vez adquiridos estos conocimientos, se realizó un estudio teórico sobre el análisis de la señal, estudiando las técnicas más importantes del análisis de vibraciones y del análisis estadístico de la señal; investigando, además, los defectos que suelen darse en diferentes elementos de las máquinas y más concretamente en los rodamientos.

El manejo del programa MATLAB 7.0 ha requerido una especial dedicación, en particular, el módulo GUIDE. Se realizó muchas pruebas tanto para construir ventanas, como para comprobar las funcionalidades de los elementos que pueden contener estas ventanas y sus propiedades (botones, ejes, cuadros de texto,...).

Otro aspecto importante del MATLAB, ha sido el diseño del interfaz gráfico y sus funcionalidades con los ejecutables que realizan los cálculos y resultados necesarios.

El paso siguiente fue descifrar las líneas del código ADEVI2.0. La adaptación de una aplicación hecha por otra persona es muy laboriosa porque las líneas de código están ya creadas y porque se intenta hacer cosas nuevas, pero tratando de aprovechar lo ya existente, para que el nuevo programa resulte más fácilmente asimilable por el usuario. La aplicación se componía de treinta y cinco ficheros de extensión“.m” y diecinueve ficheros de extensión “.fig”.

Con todo este bagaje, ya se podía afrontar la programación de ADEVI3.1 intentando asegurar que se mejoraba la aplicación ADEVI2.0 tanto en facilidad de manejo, velocidad de resolución, ampliación de resultados y posibilidades, así como una estructuración lógica de la misma.

Una vez obtenido ADEVI3.1, se pasó a traducir al inglés todas las ventanas que hay en esta aplicación. En principio, la única dificultad que se preveía eran las palabras técnicas, pero, luego, se vio que había una ventana en concreto que está programada en Visual Basic, lo que abría nuevos retos, y consecuentemente esfuerzos en cuanto a manejo de otro lenguaje de programación informática.

Concluida esta aplicación ADEVI3.1 en castellano e inglés, se diseñaron unos nuevos diagramas que varían mucho con respecto a los anteriores.



Capítulo I: INTRODUCCIÓN

El resultado final es una aplicación informática basada en interfaces gráficos que posibilita el estudio del análisis de vibraciones o simulación de vibraciones de rodamientos con defectos ofreciendo los resultados en forma de gráficos muy variados y datos estadísticos y que es susceptible de evolucionar, actualizándose a la vista de la experiencia adquirida después de su utilización práctica, bien en empresas o bien en la docencia; y también si se quiere extender a otros elementos de las máquinas.



4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La memoria de este proyecto se estructura en siete capítulos y una bibliografía.

Capítulo I: INTRODUCCIÓN. Se introduce al lector en el ámbito del proyecto y su utilidad. Se definen los objetivos a seguir durante la realización del mismo y las fases de desarrollo que se ha seguido para poder lograr los objetivos. Por último, se explica la estructuración del proyecto.

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS. Estudio de la teoría en la que se basa el proyecto. Se realiza un estudio del análisis de la señal, de la Transformada Wavelet, del espectro tempo-frecuencial, estadística descriptiva, de los defectos en máquinas y de rodamientos

Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN. Se describe brevemente el funcionamiento del MATLAB 7.0 y de una manera más detallada la aplicación informática creada: estructuración, programación y funcionamiento.

Capítulo IV: MANUAL DEL USUARIO. Se muestra lo que el usuario de esta aplicación verá y se explica de forma sencilla su funcionamiento para su posterior uso y para un mejor aprovechamiento de sus recursos.

Capítulo V: RESULTADOS. Se trata de mostrar los resultados obtenidos a través de la aplicación informática con casos concretos para verificar el correcto funcionamiento de ésta.

Capítulo VI: JUEGOS DE PRUEBAS. Se expone un juego de pruebas para demostrar la efectividad de la aplicación ante los cambios de determinados parámetros del análisis en cada uno de los módulos disponibles.

Capítulo VII: CONCLUSIONES. Se exponen las conclusiones y aportaciones que ofrece este proyecto También se exponen posibles líneas de desarrollo futuras.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS. La documentación consultada para la realización del proyecto.

Capítulo II:

FUNDAMENTOS
TEÓRICOS



II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1. ANÁLISIS DE SEÑALES

El objetivo del estudio o análisis de las vibraciones de un sistema es imprescindible a la hora de establecer un seguimiento del funcionamiento y mantenimiento del sistema, así como para eliminar la posibilidad de desperfectos en máquinas de régimen permanente, aparatos contiguos y ruidos en el ambiente.

El sistema tendrá una vibración impuesta por su régimen de funcionamiento, si las vibraciones abandonan su forma habitual, podremos detectar fallos en este sistema.

En este proyecto se pretende detectar posibles defectos en maquinaria mediante la búsqueda e identificación de vibraciones inusuales dentro del comportamiento normal de la máquina, por lo que se le han añadido las variables ruido aleatorio y defectos distribuidos porque las máquinas también sufren este tipo de vibraciones y por eso su duración puede ser menor.

La señal original no resulta sencilla para detectar defectos en el sistema, es necesario utilizar algún método que transforme los datos de partida del sistema para poder ser analizados, por lo que se utilizarán dos métodos de análisis de la señal:

- Transformada de Fourier.
- Transformada de Hilbert.

También se puede realizar el análisis de la señal mediante técnicas de la estadística descriptiva. Los parámetros estadísticos dan información adicional acerca de la señal, por tanto son parte de los experimentos.

1.1. Análisis vibratorio. Dominio temporal y frecuencial.

La señal de vibración que se obtiene es una combinación de respuestas a múltiples fuerzas internas y externas, para analizarlas de forma correcta es necesario reducir esta compleja señal en componentes fundamentales.

Existen dos perspectivas fundamentales para determinar las componentes de la vibración:

- Dominio temporal.
- Dominio frecuencial.

▪ **DOMINIO TEMPORAL**

Muestra la variación de amplitud de la vibración respecto del tiempo. La amplitud es proporcional a la cuantía de desequilibrio y a velocidad de rotación. Cuando está presente más de una componente de la vibración, el análisis en el dominio temporal se hace difícil. En la Figura 2.1. se aprecia cómo, en el dominio temporal, es difícil descomponer la señal compuesta en las ondas sinusoidales que la forman.

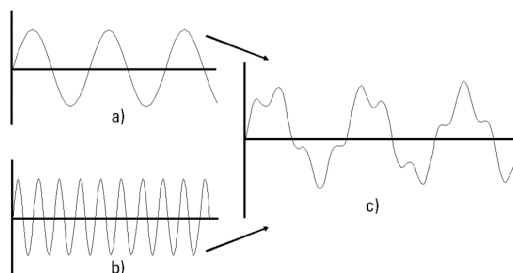


Figura 2.1. Combinación de dos señales sinusoidales

El dominio temporal es útil cuando se analizan señales impulsivas de fallos en rodamientos y engranajes y las relaciones de fase de la vibración. Las componentes individuales de la señal son difíciles de determinar. El dominio en frecuencia ofrece una perspectiva más fácil.

▪ **DOMINIO FRECUENCIAL**

Es el que representa la amplitud de la vibración respecto de la frecuencia, idóneo para identificar los componentes de la vibración. La manera más fácil de analizar esto es gráficamente. En la Figura 2.2. se representa un gráfico tridimensional de la misma señal de la Figura 2.1., los ejes son el tiempo, la amplitud y la frecuencia. En la Figura 2.2. c) se representa la amplitud frente a la frecuencia, aquí se aprecia más claramente las dos componentes de la señal que corresponden a dos picos verticales bien diferenciados. La altura de estos picos será la amplitud y la posición en el eje X es la frecuencia.

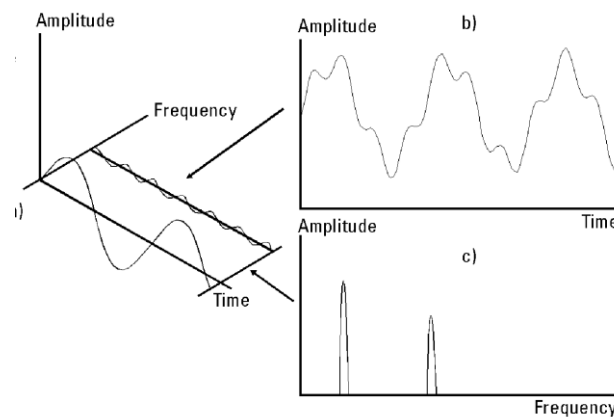


Figura 2.2. Relación entre los dominios temporal y frecuencial

Esta representación de la señal de vibración en el dominio frecuencial se denomina espectro de frecuencia.

La técnica más utilizada para transformar la señal del dominio temporal al frecuencial es la Transformada de Fourier y demuestra que en el dominio frecuencial cualquier señal se genera como suma de señales senoidales.

1.2. Transformada de Fourier (FT)

La **Transformada de Fourier** es una aplicación que hace corresponder a una función f con valores complejos y definida en la recta, otra función g definida de la manera siguiente:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

Para que la definición anterior tenga sentido, algunas condiciones técnicas tienen que ser satisfechas por la función f , a saber, f tiene que ser una función integrable en el sentido de la integral de Lebesgue. El factor que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal.

La transformada de Fourier así definida goza de una serie de propiedades de continuidad que garantizan que puede extenderse a espacios de funciones mayores e incluso a espacios de funciones generalizadas.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La transformada de Fourier tiene una multitud de aplicaciones en muchas áreas de la ciencia e ingeniería: la física, la teoría de los números, la combinatoria, el procesamiento de señales, la teoría de la probabilidad, la estadística, la óptica, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir, g corresponde al espectro de frecuencias de la señal f .

La señal vibratoria que se registra en la toma de datos de un sistema suele estar en el dominio del tiempo. Para analizar estas series de datos es mucho más eficaz y rápido un análisis en el dominio de la frecuencia ya que este análisis proporciona los picos correspondientes a las frecuencias características de vibración del sistema. Además, en este tipo de análisis cada tipo de defecto proporciona una señal diferente.

Lo más conveniente para transformar estos datos recogidos es utilizar las series de Fourier ya que la señal será periódica.

Mediante el análisis en el dominio de la frecuencia se puede descomponer una función periódica en sus correspondientes componentes armónicas. Una señal temporal $x(t)$ de período T se puede expresar:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \sin \frac{2\pi kt}{T} \right)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \\ a_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin \frac{2\pi kt}{T} dt \end{aligned}$$

Además teniendo en cuenta el hecho de que:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$$

Es posible escribir la transformada de Fourier en forma compleja.

De esta forma la transformada de Fourier $X(\omega)$ de una función $x(t)$:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

Además, también es posible obtener la Transformada inversa de Fourier:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} dt$$

Hay que considerar que tiene la limitación de que la función debe cumplir que:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} dt$$

Se muestrea la señal $x(t)$ en una serie de instantes regularmente espaciados, en un intervalo de muestreo Δ , a lo largo de un período de tiempo T , siendo N el número de muestras, de donde se obtiene que $T = N \Delta$.

Se obtiene una serie x_r con N elementos en vez de una función continua $x(t)$. Esto lleva a modificar la transformada de Fourier para poder aplicarla. Al modificarla se llega a la nueva fórmula que se denomina Transformada discreta de Fourier (DFT, Discrete Fourier Transform) que será del modo:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i2\pi kr/N} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$$

En la siguiente figura, Figura 2.3, se muestra la transformación aplicada a una señal $g(t)$ al efectuar la convolución con diferentes señales temporales. En cada caso la Transformada de Fourier va cambiando hasta llegar al caso de la señal temporal muestreada periódica.

En la Figura 2.3. (a) se observa una señal temporal $g(t)$ y su correspondiente Transformada de Fourier $G(t)$.

En la Figura 2.3. (b) se presenta la señal temporal truncada en el tiempo y replicada a derecha e izquierda, la serie de Fourier asociada es discreta en el dominio de frecuencia.

En la Figura 2.3. (c) se aprecia la transformada obtenida del muestreo de la función temporal sin trincar, este muestreo genera una transformada de periodo igual al periodo de muestreo, considerando el semiperiodo positivo al ser una función par.

En la Figura 2.3. (d) se observa la Transformada de Fourier obtenida a partir de una señal temporal truncada replicada a derechas y a izquierdas y muestreada en el tiempo.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Una vez expuestas las transformadas de Fourier continuas y discretas es necesario destacar que el proceso normal es comenzar haciendo una estimación de la función de correlación correspondiente y posteriormente obtener su transformada de Fourier para obtener el espectro deseado.

Sin embargo, esto no se hace así ya que se dispone de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) que permite obtener de manera más rápida y precisa, y directamente de la serie temporal original, la estimación espectral de la señal.

El mecanismo básico de la FFT es que partiendo de la serie completa x_r la subdivide en sucesiones más cortas, por lo que no calcula la DFT de la serie original completa sino de otras más cortas, para finalmente combinándolas entre sí obtener la de la serie original, con el consiguiente ahorro operacional.

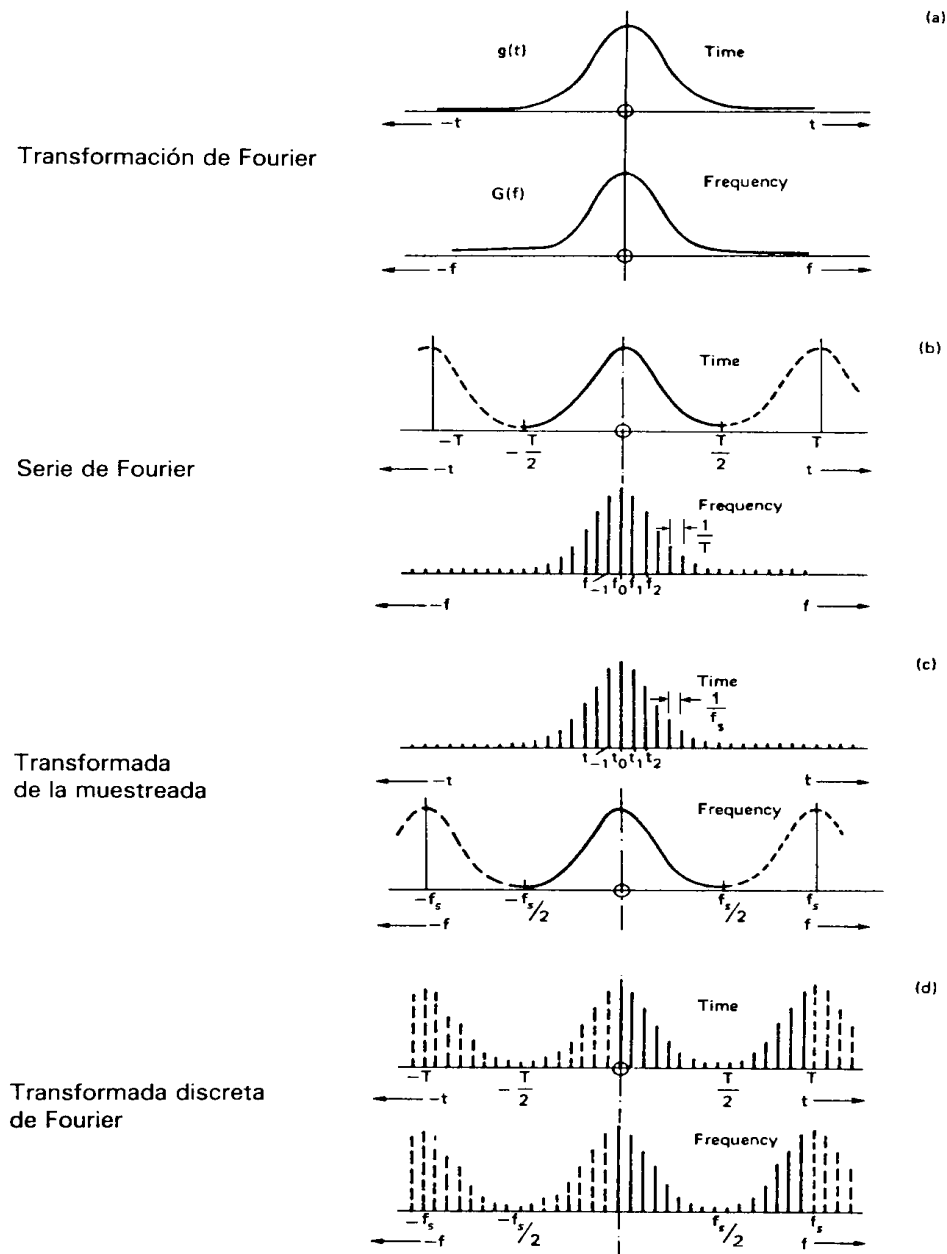


Figura 2.3. Representación gráfica de la transformada discreta de Fourier aplicada sobre una señal temporal $g(t)$ al efectuar la convolución con diferentes señales temporales.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Si se divide la serie en dos semisucesiones ($z_r = x_{2r+1}$ e $y_r = x_{2r}$) se puede obtener X_k de estas dos, teniendo además en cuenta que Z_k e Y_k son periódicas en k y que se repiten con período $N/2$, esto es necesario ya que las sucesiones z_r e y_r tienen sólo $N/2$ elementos. Finalmente y asumiendo que $W = e^{-i2\pi/N}$ se tiene:

$$\begin{aligned} X_k &= \frac{1}{2} [Y_k + W^k Z_k] \\ X_{k+N/2} &= \frac{1}{2} [Y_k - W^k Z_k] \end{aligned} \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$$

Una vez definido este proceso es evidente que para que funcione se debe tomar una serie original x_r que tenga un número de elementos de potencia de 2 (2^n), ya que este proceso es la FFT de base 2. También se podría realizar para otros números, es decir, para otras bases, pero su programación es más complicada y además en el caso de la base 2 la posibilidad de prolongar artificialmente la sucesión por adición de ceros no representa problemas.

Con el método de cálculo de la FFT se reduce de modo importante el número de operaciones a realizar. Inicialmente mediante la DFT había que realizar N multiplicaciones de la forma $(x_r) \cdot (e^{-i2\pi kr/N})$ para cada uno de los N valores de X_k , lo que lleva a realizar un total de N^2 multiplicaciones, sin embargo con la FFT se reduce este valor a uno de aproximadamente $N \cdot \log_2 N$, lo que lleva a una reducción como la mostrada en la Tabla 2.1.:

Tabla 2.1. Reducción de cálculos con el uso de FFT.

Número de elementos N	Relación entre DFT y FFT $\frac{N^2}{N \log_2 N}$
4	2
16	4
64	10.7
256	32
1024	102.4
4096	341.3
16384	1170.3

En la Figura 2.4. se representa el proceso de discretización que se sigue para la obtención de un espectro de frecuencia a través de la transformada rápida de Fourier (FFT).



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En la Figura 2.4. (a) se muestra una señal temporal $g(t)$ y su espectro o transformada de Fourier $G(f)$ (suponiendo ambas de longitud infinita).

La primera etapa en un proceso digital es discretizar la señal temporal, como se puede observar en la Figura 2.4. (b). Esta discretización se puede considerar como el equivalente a la multiplicación de la señal temporal por un tren de impulsos de $\Delta_1(t)$ con un intervalo de muestreo Δt . La transformada de Fourier de este tren de impulsos $\Delta_1(f)$, se corresponde con otro tren de impulsos a todos los múltiplos de la frecuencia de muestreo $f_s=1/\Delta t$. El resultado de la multiplicación en el dominio de tiempo, que se corresponde con la convolución de las dos transformadas (señal temporal y señal de muestreo) en el dominio de la frecuencia, se muestra en la Figura 2.4. (c), donde se observa la señal temporal ya discretizada y su transformada correspondiente.

La siguiente etapa será limitar la señal temporal a una longitud en el tiempo adecuada, para obtener un registro temporal finito. Esto es equivalente a la multiplicación en el dominio del tiempo de la señal temporal por una función que se denomina “ventana” (en la Figura 2.4. (d) se puede ver la representación de una ventana rectangular con su espectro característico).

En la Figura 2.4. (e) aparece ya realizada la multiplicación anterior en el dominio temporal, lo que se corresponde con la convolución de los espectros de ambas funciones en el dominio de la frecuencia.

Finalmente, no es posible representar un espectro continuo como el de la Figura 2.4. (e) en una memoria digital, por ello es necesario discretizarlo de forma similar a la realizada con la función temporal a la que se le ha aplicado la ventana (Figura 2.4. (e)) por el tren de impulsos o muestras $\Delta_2(f)$, separados por el intervalo Δf (Figura 2.4. (f)), cuya transformación al dominio temporal es otro tren de impulsos separados un periodo $T=1/\Delta f$. El resultado de dicha multiplicación en el dominio de la frecuencia (convolución en el dominio temporal) se representa en la Figura 2.4. (g).

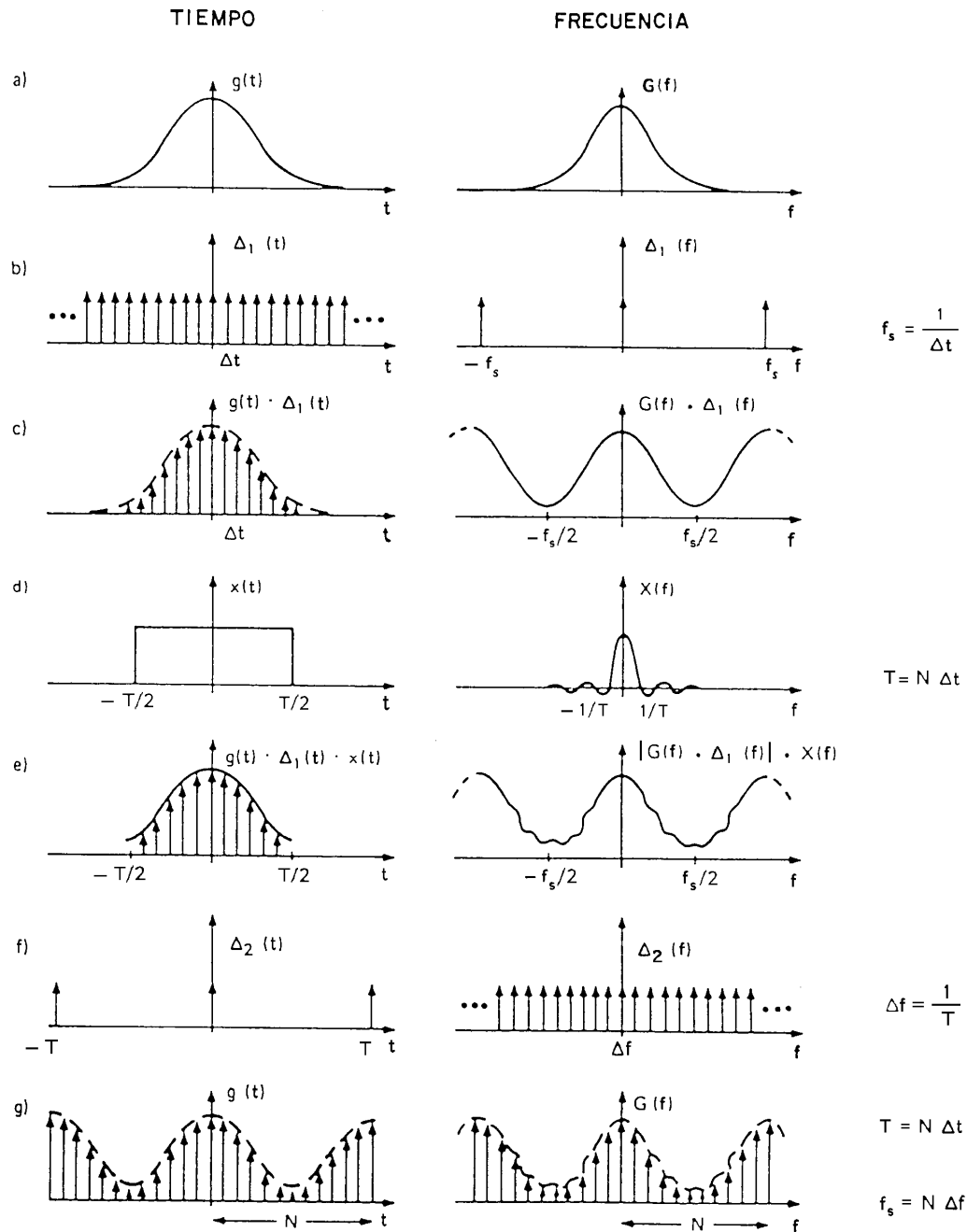


Figura 2.4. Representación gráfica del proceso seguido para la obtención de un espectro de frecuencia a través de la transformada rápida de Fourier (FFT).

LIMITACIONES DEBIDAS AL PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

Debido al muestreo de la señal con un período finito, se presentan una serie de limitaciones y distorsiones en el análisis.

Inicialmente se realiza un procesamiento de la señal digital a una señal analógica. Esta señal analógica se representa como una secuencia de N puntos obtenidos en un período T, tomados con un intervalo de separación de Δ . Ya que el número de puntos N será fijo, hay que elegir entre precisión a altas o bajas frecuencias.

Algunas de estas limitaciones pueden solucionarse mediante la utilización de la Transformada de Fourier a corto plazo.

1.3. La Short Time Fourier Transform (STFT)

Consiste en dividir la señal en diferentes partes donde se puede asumir que la señal es estacionaria. Para este propósito la señal es multiplicada por una función ventana, cuya anchura debe ser igual a la parte de la señal que puede ser considerada como estacionaria. La nueva señal es el producto de la función ventana y la señal original a la que se le aplica la transformada de Fourier.

El resultado de esta transformación es la transformada de Fourier de los primeros “T/2” segundos de la señal original, si esta parte de la señal es estacionaria quiere decir que los resultados obtenidos mostrarán la representación en frecuencia exacta de los primeros “T/2” segundos.

El próximo paso será desplazar esta ventana a una nueva localización hasta que toda la señal sea recorrida.

Lo anterior se resume en la ecuación:

$$STFT_X^W(t', f) = \int_t [x(t) \cdot w^*(t - t')] \cdot e^{-j2\pi ft} \cdot dt$$

donde:

$x(t)$: Señal original

w^* : Función ventana conjugada.

En cada instante t' y frecuencia f se calcula un nuevo coeficiente de la transformada de Fourier.

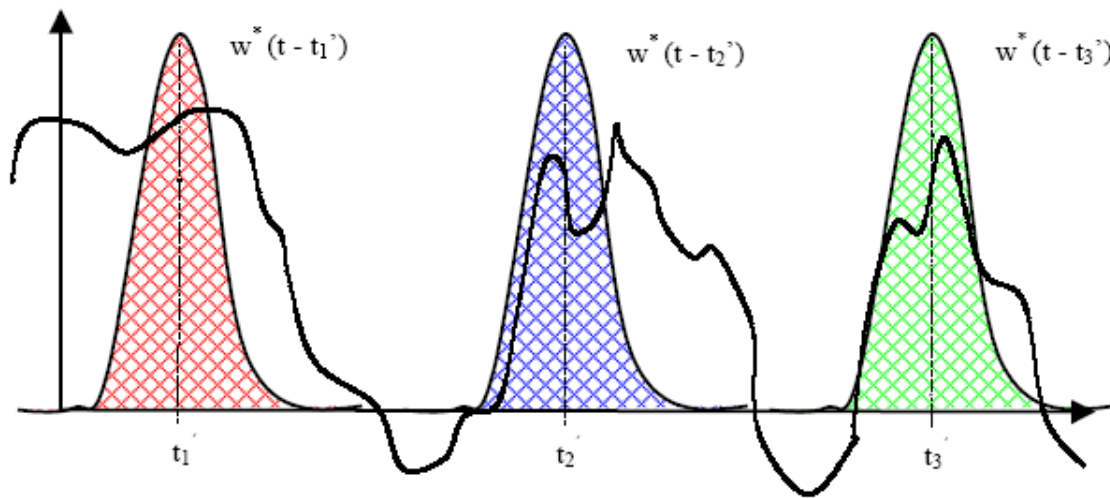


Figura 2.5. Explicación gráfica de la STFT.

En la Figura 2.5. se muestra una función ventana de tipo Gaussiana, la primera función “roja” muestra la ventana localizada en $t=t_1'$, la segunda “azul” en $t=t_2'$ y la tercera “verde” en $t=t_3'$. Estas ventanas corresponden a tres transformadas de Fourier en tiempos distintos. Por lo tanto se obtendrá una buena representación tiempo-frecuencia de la señal.

Una forma de comprender como trabaja la STFT, es a partir de un ejemplo, para ello considérese la señal no estacionaria de la Figura 2.4.

Como se observa en la Figura 2.6., la STFT de esta señal se puede representar en tres dimensiones (tiempo-frecuencia-amplitud) y se advierte que la gráfica es simétrica con respecto al punto medio del eje de la frecuencia, puesto que la STFT es la versión en ventanas de la TF clásica, la cual es siempre simétrica.

Lo importante es que existen cuatro picos correspondientes a los cuatro componentes en frecuencias de la señal original y además están localizados en diferentes intervalos de tiempo. Por lo tanto se cuenta con una representación tiempo-frecuencia de la señal, puesto que no sólo se conocen los componentes de frecuencia de la señal, sino también su localización en el tiempo.

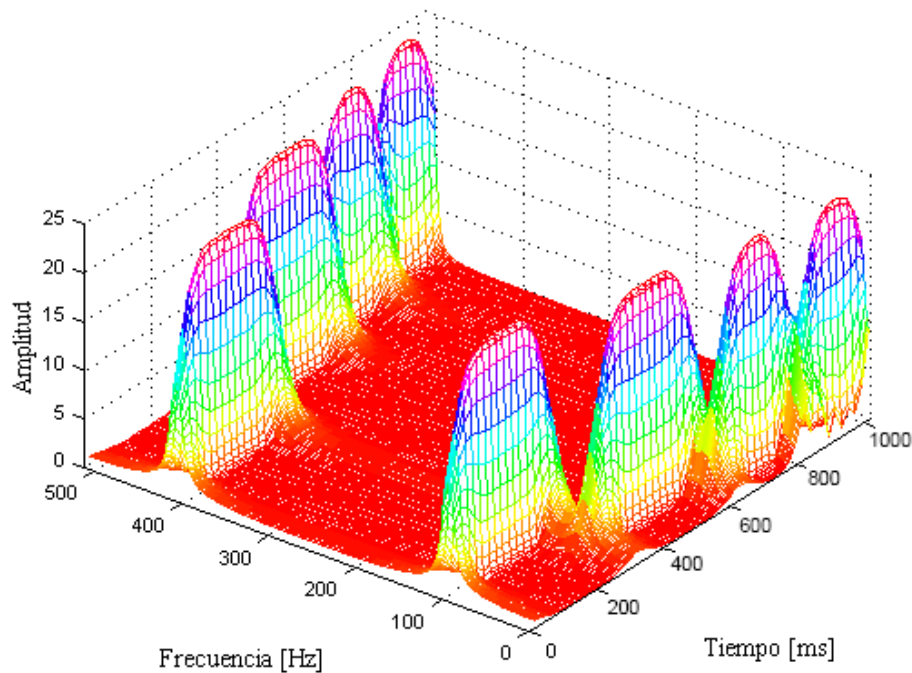


Figura 2.6. STFT de la señal de la Figura 2.4. con ventana gaussiana de $a=180$.

Con lo anterior parecería que el problema de la representación tiempo-frecuencia de una señal estaría resuelto; sin embargo, existe un problema que tiene su base en el principio de incertidumbre de Heisenberg; que en este caso se traduce en que no es posible la representación exacta tiempo-frecuencia de una señal, sino tan sólo los intervalos de tiempo en los cuales existen determinadas bandas de frecuencia, por lo tanto, aparece un problema de resolución.

En la transformada de Fourier no existe problema de resolución en el dominio de la frecuencia, se sabe exactamente las frecuencias que existen, de manera similar no existe problema de resolución en el dominio del tiempo, ya que se conoce el valor de la señal para cada instante de tiempo. Lo que proporciona la perfecta resolución en frecuencia en la TF es el hecho de que la ventana empleada es la función exponencial $e^{j\omega t}$, la cual existe en todo instante de tiempo $[-\infty, +\infty]$. En la STFT la ventana es de longitud finita, es decir sólo se aplica a una parte de la señal, causando una disminución de la resolución en frecuencia, con lo cual sólo es posible conocer una banda de frecuencias y no un valor exacto de las frecuencias.

En consecuencia, existe un compromiso entre buena resolución en el tiempo o buena resolución en frecuencia. Para obtener una señal estacionaria, se elige una ventana lo suficientemente estrecha que permita ser considerada así. Cuanto más estrecha sea la ventana mejor resolución en el tiempo obtendremos y por lo tanto una mejor representación de la estacionalidad y peor resolución en frecuencia.

Por tanto, el problema consiste en la selección de una ventana para el análisis, dependiendo de la aplicación.

Si las componentes frecuenciales están bien separadas unas de otras en la señal original, se puede sacrificar la resolución en frecuencia y tratar de mejorar la resolución en el tiempo. Por ejemplo en la Figura 2.7., se muestran dos posibilidades, dependiendo de la resolución deseada en tiempo y frecuencia.

En el primer caso, se utiliza una mejor resolución en el tiempo a costa de perder información en frecuencia. En el segundo caso, la resolución en frecuencia se incrementa a costa de perder resolución en el tiempo.

En resumen:

Ventana estrecha \Rightarrow Buena resolución en el tiempo y pobre en el dominio de la frecuencia.

Ventana ancha \Rightarrow Buena resolución en el dominio de la frecuencia y pobre en el dominio del tiempo.

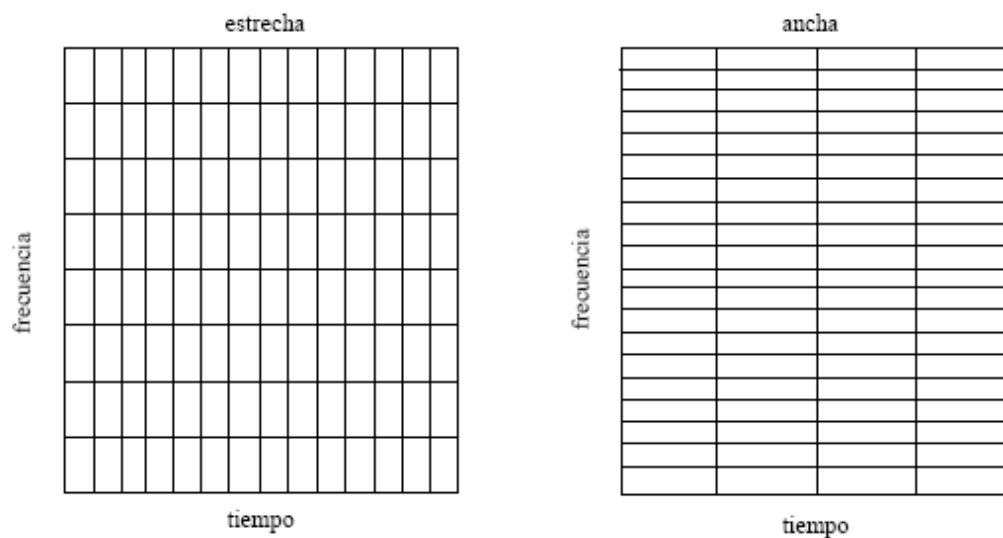


Figura 2.7. Enrejado resultante en el plano tiempo-frecuencia de la STFT.

A fin de comprender como trabaja la STFT se muestra a continuación el análisis de la STFT de la señal de la Figura 2.4. considerando una ventana gaussiana de diferentes anchuras.

$$w(t) = e^{-\frac{t^2}{2a}}$$

Donde “a” representa la anchura de la ventana.

La Figura 2.8. muestra cuatro funciones gaussianas de ventanas de diferentes anchuras.

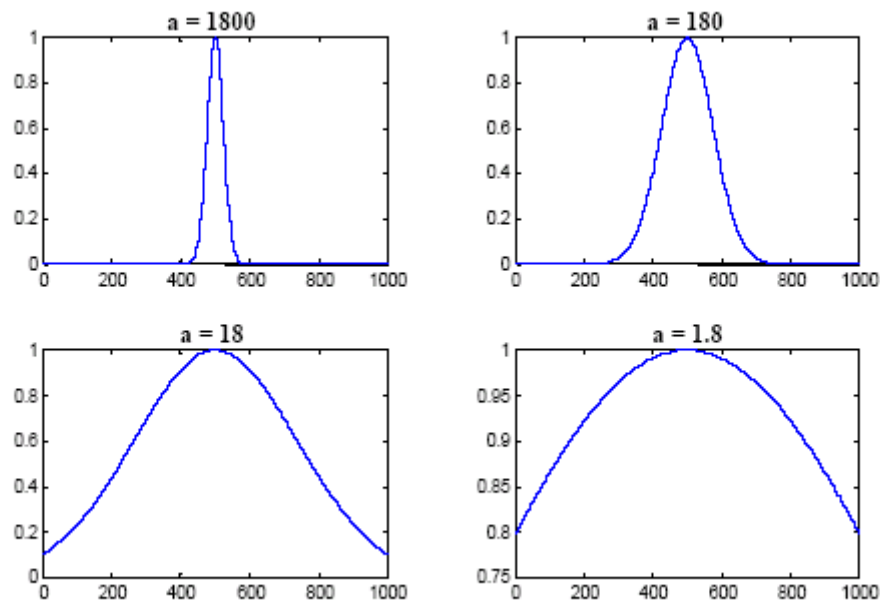


Figura 2.8. Representación de la función gaussiana para diferentes anchuras.

Aplicando a la función de la Figura 2.4. la función ventana más estrecha ($a=1800$) para el cálculo de la STFT, se observa en la Figura 2.9. una alta resolución en el tiempo y una pobre resolución en la frecuencia.

En dicha figura se comprueba que los cuatro picos que existen están bien separados los unos de los otros en el dominio del tiempo. Además en el dominio de la frecuencia, cada pico cubre un rango de frecuencias, en lugar de un único valor de frecuencia.

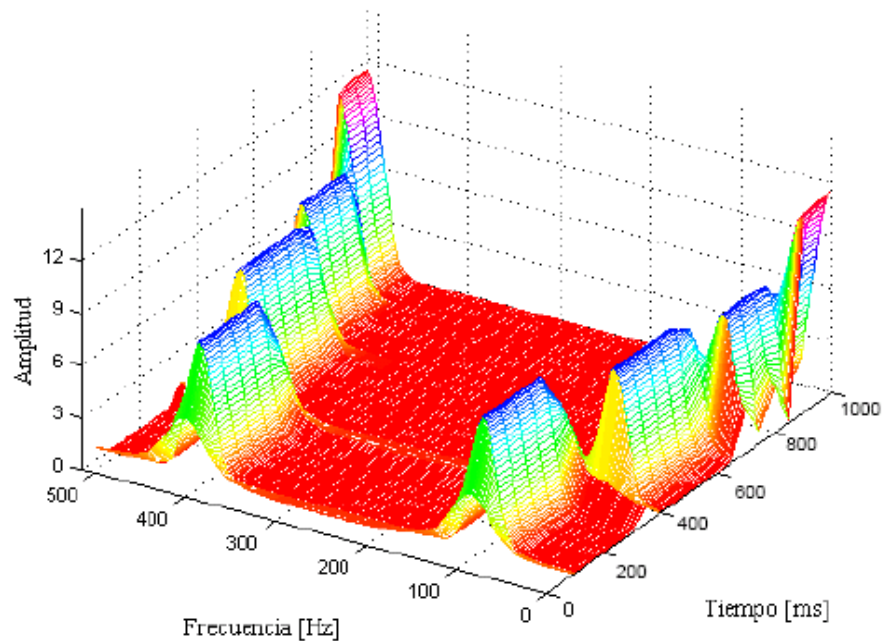


Figura 2.9. STFT de la Figura 2.4. con función ventana gaussiana de valor $a=1800$.

En el caso de hacerse más ancha la ventana, por ejemplo $a=18$ (el caso de $a=180$ está mostrado en la figura 2.6.), el resultado se muestra en la Figura 2.10.

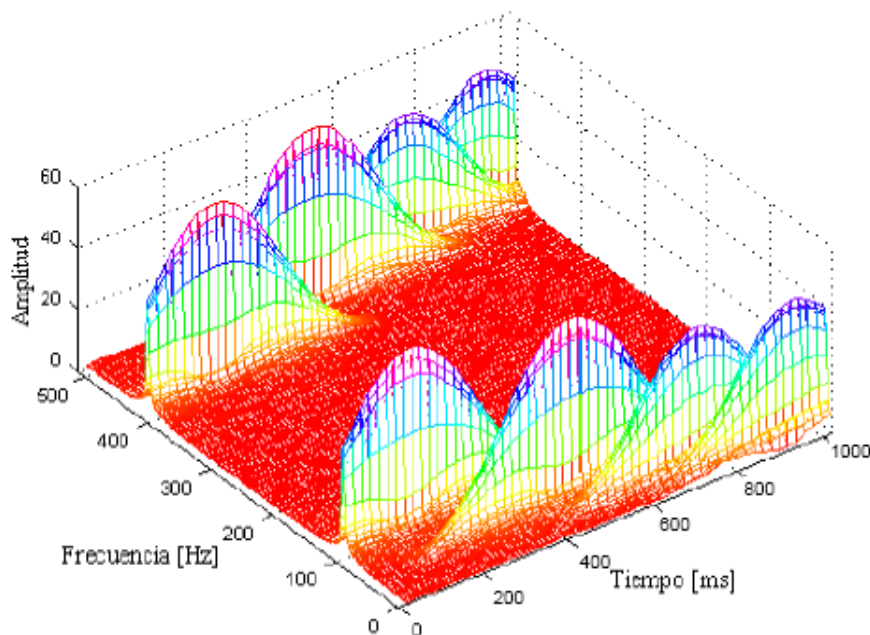


Figura 2.10. STFT de la función de la Figura 2.4. con función ventana gaussiana de valor $a=18$.

En esta figura se comprueba que los cuatro picos, correspondientes a cada frecuencia presente en la señal, no están tan bien separados en el dominio del tiempo como sucedía en el caso anterior, sin embargo, la resolución en el dominio del tiempo ha mejorado.

El caso correspondiente a la anchura de la ventana gaussiana mayor se encuentra en la Figura 2.11. El resultado no debería sorprender, ya que como cabría esperar se detecta una resolución en el dominio temporal muy mala, sin embargo, cada pico cubre un rango de frecuencias muy estrecho.

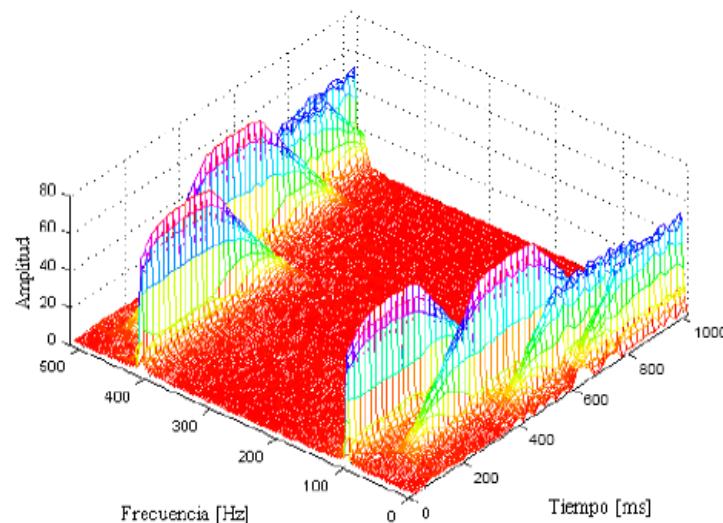


Figura 2.11. STFT de la función de la Figura 2.4. con función ventana gaussiana de valor $a=1.8$.

Estos ejemplos muestran el problema implícito de resolución que existe en la STFT. Cuando se desea aplicar esta transformada se debe decidir la clase y características de la ventana a emplear. Ventanas estrechas proporcionan pobre resolución en el dominio de la frecuencia pero buena en el dominio del tiempo. Ventanas anchas por el contrario, aportan buena resolución en el dominio de la frecuencia y mala en el dominio temporal, pero con el riesgo de que se viole el principio de estacionalidad.

Si las componentes en frecuencia de la señal están bien separadas entre sí, entonces, se podría sacrificar algo de resolución en frecuencia y preferir una buena resolución temporal, ya que las componentes espectrales están bien separadas. Pero si la señal no presenta estas características la elección de una buena ventana se complica.

Por lo tanto, se debe encontrar una transformada que dando información tiempo-frecuencia de la señal solucione el problema implícito en la STFT. La transformada Wavelet (WT) resuelve este problema, como se detallara en capítulos posteriores.



1.4. Espectrograma

Hasta ahora se ha visto que una señal tiene una representación temporal o frecuencial. Sin embargo, es posible trabajar con representaciones conjuntas tiempo/frecuencia que dan la información simultánea (aunque con limitaciones) sobre lo que está pasando en ambos dominios. Esto se consigue con el espectrograma.

El espectrograma es una representación visual de las variaciones de la frecuencia en el eje vertical, y de la intensidad mediante los niveles de colores o grises del sonido que se está representando a lo largo del tiempo que se representa en el eje horizontal. El espectrograma es la gráfica resultante de un espectrógrafo, instrumento capaz de expresar una forma de onda en un gráfico. Hay varios tipos de espectrógrafos, dependiendo de la naturaleza de las ondas.

Para la obtención del espectrograma se aplica, inicialmente, una transformada de Fourier inicialmente a la señal. Dependiendo del tamaño de la ventana que utilicemos para el análisis de Fourier tendremos diferentes niveles de resolución del espectrograma. Si se aplica una ventana muy grande obtendremos un espectrograma muy detallado pero a costa de incrementar el tiempo de cálculo necesario para esta operación. Para el caso de una ventana demasiado pequeña el efecto es el inverso y no seremos capaces de distinguir los diferentes armónicos si están muy juntos en el espectrograma.

El espectrograma sirve para analizar, entre otras aplicaciones, las vibraciones en rodamientos y localizar los defectos que puedan tener, al detectar el distinto tipo de sonido que la presencia del defecto produciría.

La señal de sonido del rodamiento puede transformarse al dominio tiempo-frecuencia utilizando varios métodos como el espectrograma, la distribución de Wigner, Wavelets,...El espectrograma, es el más estable, entre estos diferentes métodos, frente al ruido y no presenta términos cruzados como sucede con los otros.

Para calcular y representar el espectrograma mediante MATLAB se han de fijar determinados parámetros, por ejemplo:

1. Longitud de la ventana.
2. Solapamiento de las ventanas.
3. Tipo de ventana.
4. Frecuencia mínima a ser mostrada.
5. Frecuencia máxima a ser mostrada.

El tipo de representaciones que se pueden obtener son:

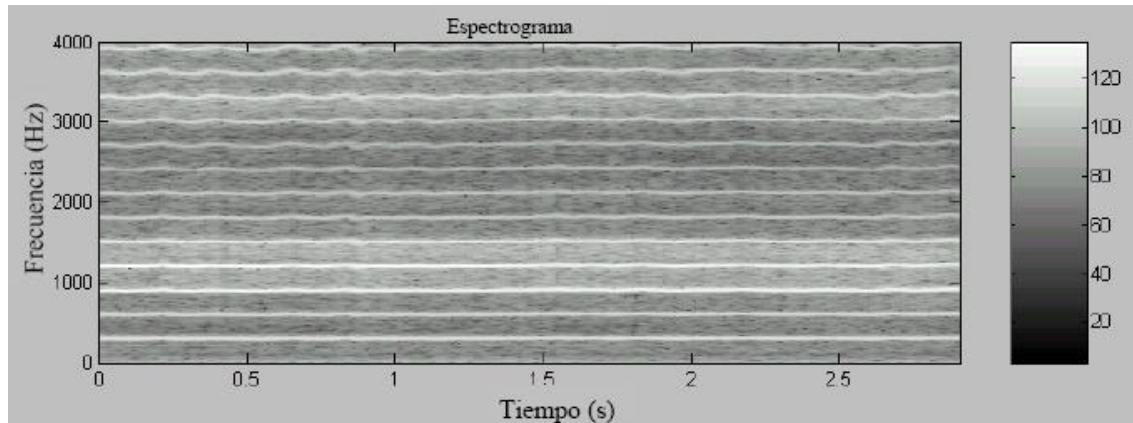


Figura 2.12. a. Ejemplo de espectrograma: frecuencia-tiempo.

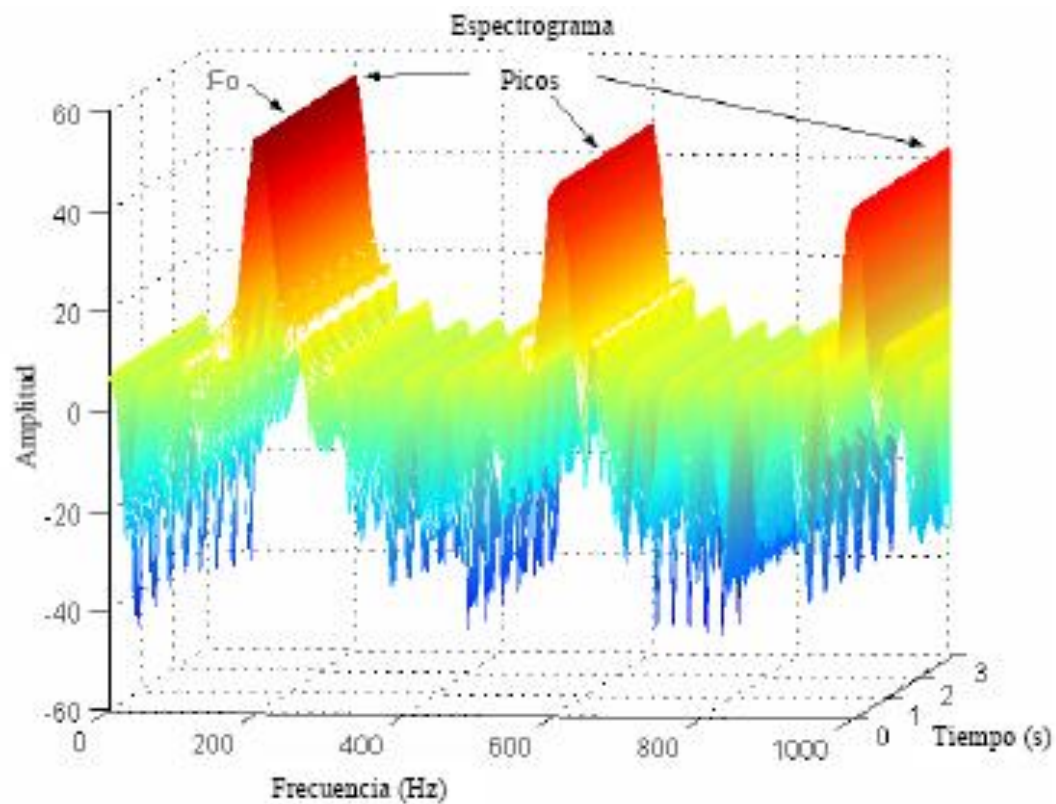


Figura 2.12. b. Espectrograma en el espacio tridimensional: amplitud-frecuencia-tiempo.

Dependiendo de la longitud de la ventana, número de muestras de las que se compone el intervalo temporal, se distinguen dos tipos de espectrogramas: de banda ancha y de banda estrecha.

Espectrograma de banda ancha tiene una resolución frecuencial pequeña, con lo que se puede ver cada periodo de la señal siguiendo su evolución temporal, al haber mayor resolución en este dominio. Figura 2.12. d.

Espectrograma de banda estrecha, tiene buena resolución frecuencial y peor resolución en el temporal. Como se aprecia en la Figura 2. 12. e.

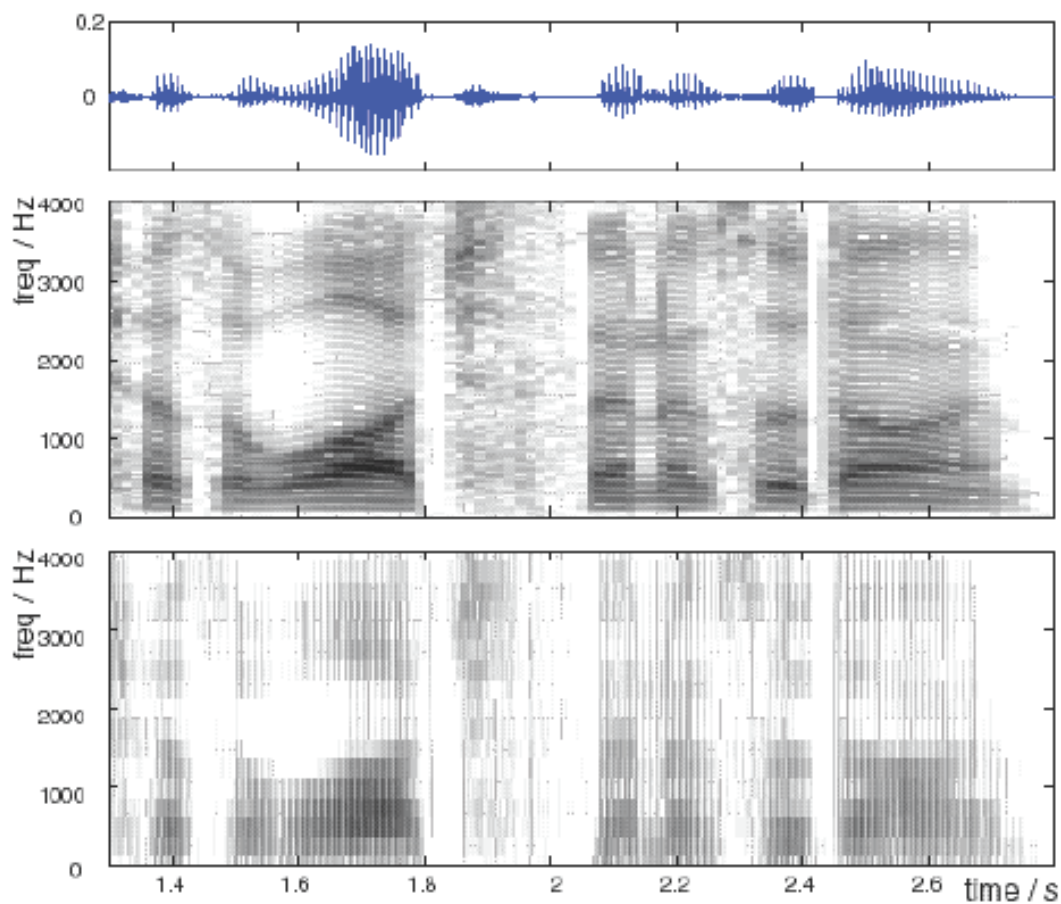


Figura 2.12. c. Señal original en el dominio temporal.

Figura 2.12. d. Banda estrecha con una longitud de ventana de 256 muestras.

Figura 2.12. e. Banda ancha con una longitud de ventana de 32 muestras.

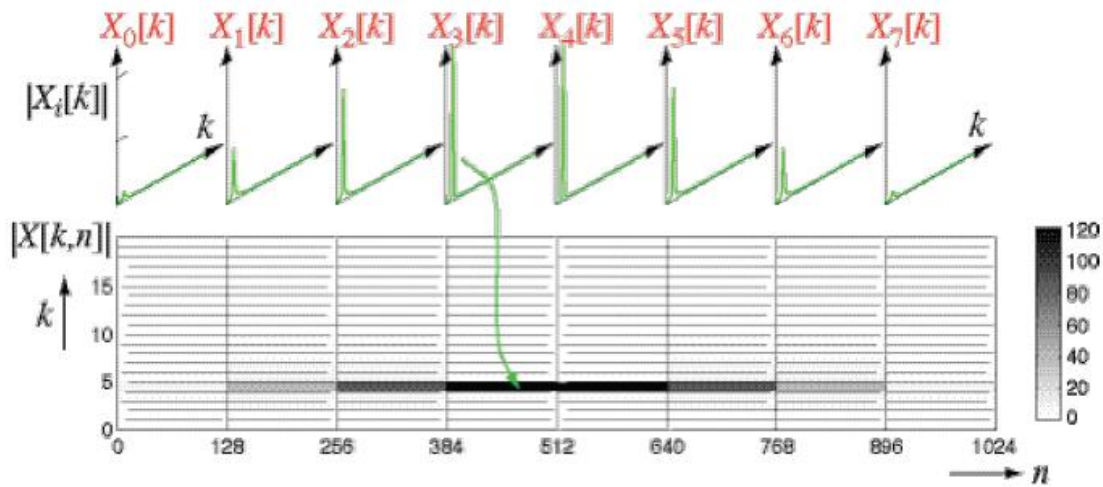


Figura 2.12. f. Representación sucesiva de la DFT en tiempo-frecuencia.

En la Figura 2. 12. f. el espectrograma está dividido en diversas columnas y filas. Cada columna significa un intervalo temporal, en este caso es de 128 muestras cada una, y cada fila muestra la información en intervalos frecuenciales. Cada cuadrito (el que forma el intervalo frecuencial con el temporal) indica el valor que tiene la amplitud de la señal estudiada, este valor se obtiene de la franja que se encuentra a la derecha. Encima del espectrograma se muestra el espectro de la señal obtenida con la transformada discreta de Fourier. Se comprueba que el espectro de la señal con la amplitud mayor coincide en el espectrograma con la zona más oscura, como se indica en la figura con la flecha verde.

A continuación se muestra un ejemplo de espectrograma obtenido con el programa MATLAB en dos dimensiones.

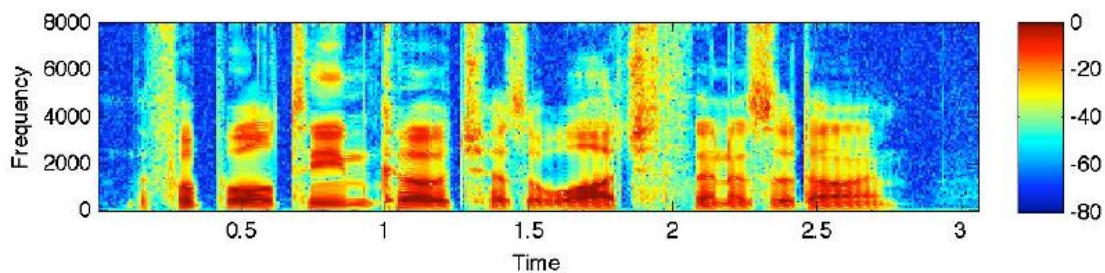


Figura 2.12. g. Espectrograma en MATLAB.

1.5. Análisis mediante técnicas de estadística descriptiva

Partiendo de una muestra experimental obtenida de un ensayo se puede recoger más información de la muestra mediante un programa estadístico adecuado. Por ello, debemos considerar la estadística como parte integrante del diseño de experimentos.

La estadística se interesa en gran medida en deducir conclusiones a partir de muestras alteradas por variaciones aleatorias o incertidumbres. Sólo mediante la teoría de la probabilidad se pueden definir o expresar, así como controlar, tales incertidumbres en los resultados.

La estadística descriptiva resuelve la etapa de tabulación y descripción de resultados de experimentos aleatorios de la investigación estadística. Se basa en el conjunto de definiciones siguientes:

- *Universo:* Grupo específico de objetos de los que se trata de estudiar una característica particular.
- *Población:* Es la totalidad de valores posibles de una característica particular de un universo.
- *Tamaño de la población:* Es el número de elementos que tiene una población, es decir, el número total de valores posibles que puede tener la característica particular del universo que se estudia.
- *Muestra:* Es una parte de la población obtenida de acuerdo a una regla determinada.
- *Tamaño de la muestra:* Es el número de elementos que forman la muestra.
- *Frecuencia, frecuencia relativa y frecuencia relativa acumulada:*

Supóngase que se tienen los n elementos de una muestra de tamaño n obtenida de una población, y que en ésta hay:

f_1 resultados idénticos a x_1

f_2 resultados idénticos a x_2

f_3 resultados idénticos a x_3

....

f_k resultados idénticos a x_k en donde:

$$\sum_{i=1}^k f_i = n$$

y $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ son k valores numéricos asociados a los eventos observados al realizar el experimento aleatorio que define la muestra, es decir, son valores observados de una variable aleatoria x asociada a la población. Los números $f_1, f_2, f_3, \dots, f_k$ se llaman frecuencias de ocurrencia de los valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$, respectivamente. El cociente de una frecuencia f_i entre el total de observaciones n (el tamaño de la muestra), se llama la frecuencia relativa de ocurrencia del valor x_i correspondiente. Representando la frecuencia relativa con f_i^* , se tiene que:

$$f_i^* = \frac{f_i}{n}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k$$

Se llama frecuencia relativa acumulada de un valor x_i , a la suma de frecuencias relativas de todos los valores menores o iguales al valor x_i considerado. Si F_i es la frecuencia relativa acumulada de x_i , se tiene:

$$F_i = \sum_{j=1}^i f_j^*, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

PARÁMETROS DESCRIPTIVOS DE UNA DISTRIBUCIÓN EMPÍRICA

Se llama distribución empírica de frecuencias de la variable aleatoria x , al conjunto de parejas (x_i, f_i^*) , en donde $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Como en el caso de la distribución de probabilidad, una distribución empírica describe completamente a la muestra de donde fue obtenida, ya que los valores de x_i dan los valores observados de la característica de la población en la muestra, y sus correspondientes frecuencias relativas f_i^* proporcionan la forma como se presentan esos resultados.

Como en las distribuciones teóricas de probabilidad, en las distribuciones empíricas existen diferentes parámetros descriptivos que resumen una gran cantidad de información sobre las muestras. Estos parámetros se clasifican en medidas de tendencia central, medidas de dispersión y medidas de forma. Dentro de las medidas de tendencia central se tienen la media, la mediana y la moda; dentro de las medidas de dispersión se mencionarán al rango, la variancia, la desviación estándar y dentro de las medidas de forma, se nombrará al coeficiente de asimetría (sesgo) y al de apuntamiento (kurtosis).

Las medidas de centralización representan valores promedios o medidas de posición de los datos de la muestra. Los más importantes se describen y formulan brevemente a continuación.

- *Media:* La media es el más común de los parámetros descriptivos de tendencia central. Se define como el promedio aritmético de todos los datos de la muestra.

De acuerdo a la definición anterior, si $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son valores observados de la variable aleatoria x correspondientes a una muestra de tamaño n obtenida de una población, la media, representada por \bar{x} , es:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n}$$

Si los datos de la muestra están concentrados en una tabla de frecuencias, en donde las marcas de clase son t_i y las frecuencias f_i con $i=1, 2, 3, \dots, k$, entonces la media de la muestra queda definida por:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i f_i}{\sum_{i=1}^k f_i} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i f_i}{n}$$

- *Mediana:* La mediana es un valor tal que la mitad de las observaciones son menores que ese valor y la otra mitad mayores que el mismo. Su valor puede determinarse ordenando los datos de la muestra de menor a mayor y tomando el elemento central cuando exista, el elemento que esta situado en la posición $(n + 1) / 2$ para n impar. Si no existe, conviene tomar como mediana al promedio de los dos elementos centrales.

Cuando los datos se encuentran agrupados en una tabla de frecuencias, la mediana puede obtenerse aproximadamente aceptando que las observaciones pertenecientes a cada intervalo de clase se distribuyen uniformemente en el mismo.

El intervalo de clase en donde está alojada la mediana se determina de la columna de frecuencias relativas acumuladas de la tabla de frecuencias: aquél para el cual ocurre primero que F_i es mayor de 0,5. Para este intervalo supóngase que L_1 es su límite interior, c la amplitud de ese intervalo, $(\sum f)_1$ la suma de las frecuencias de los intervalos anteriores a aquél en donde está alojada la mediana y f_m la frecuencia del mismo intervalo de clase; entonces, la mediana será igual a L_1 más una parte del intervalo de amplitud c que complete la mitad de las observaciones a la izquierda de la mediana, como se muestra en la Figura 2.13.

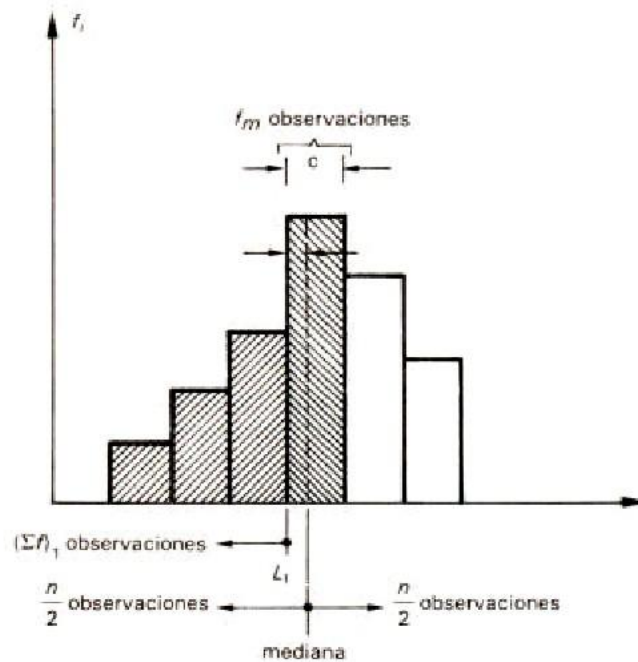


Figura 2.13. Histograma de frecuencias para el cálculo de la mediana.

Como las observaciones están uniformemente distribuidas en el intervalo de clase de la mediana, la parte de c que hay que sumar a L_1 debe ser proporcional al número de observaciones simuladas a la derecha de L_1 necesarias para llegar a la mitad, es decir:

$$\frac{\frac{n}{2} - (\sum f)_1}{f_m}$$

Por lo tanto, la mediana podrá calcularse aproximadamente por medio de:

$$\bar{x} = L_1 + c \left[\frac{\frac{n}{2} - (\sum f)_1}{f_m} \right]$$

- **Moda:** La moda de una muestra es la observación que se presenta con mayor frecuencia, es el valor más representativo y descriptivo de la muestra. Desde luego que la moda puede ser única o tener varios valores, ocultando un poco su propiedad de descripción.

Cuando los datos de una muestra se encuentran concentrados en una tabla de frecuencias, no es posible calcular exactamente el valor de la moda. En este caso se obtiene aproximadamente su valor resolviendo los triángulos semejantes que se muestran en la Figura 2.14.

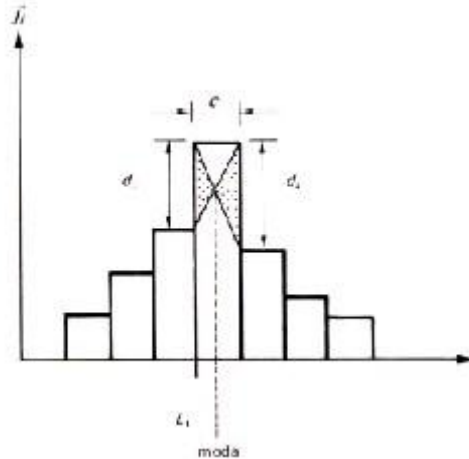


Figura 2.14. Histograma de frecuencias para el cálculo de la moda.

Teniendo en cuenta que L_1 es el límite inferior del intervalo de clase que contiene a la moda (el de mayor frecuencia), c la amplitud de ese intervalo modal, d_1 la diferencia en valor absoluto de la frecuencia del intervalo modal y la frecuencia del intervalo de clase anterior al modal, y d_2 la diferencia en valor absoluto de la frecuencia del intervalo modal y la frecuencia del intervalo de clase que sigue al modal, se obtiene:

$$\begin{aligned}\frac{\hat{x} - L_1}{d_1} &= \frac{c - (\hat{x} - L_1)}{d_2} \\ \frac{d_2}{d_1} &= \frac{c - (\hat{x} - L_1)}{\hat{x} - L_1} \\ \frac{d_2}{d_1} &= \frac{c}{\hat{x} - L_1} - 1 \\ \hat{x} &= L_1 + c \left[\frac{d_1}{d_1 + d_2} \right]\end{aligned}$$

Cuando el histograma de una distribución empírica es casi simétrico, se puede estimar el valor de la moda a partir de la relación que existe entre la media, mediana y moda. Se ha encontrado que en distribuciones empíricas moderadamente asimétricas, la distancia entre la media y la mediana es un tercio de la distancia entre la media y la moda, es decir:

$$\bar{x} - \tilde{x} = \frac{1}{3}(\bar{x} - \hat{x})$$

Con esta relación se puede estimar la moda de la manera siguiente:

$$\hat{x} = \bar{x} - 3 * (\bar{x} - \tilde{x})$$

- *Media geométrica:* Existe otro tipo de promedio que resulta de interés en los cálculos de ingeniería. Se trata de la media geométrica, definida como la raíz enésima del producto de n observaciones. Así, la media geométrica, de n observaciones x_1, x_2, \dots, x_n es:

$$\bar{x}_g = \sqrt[n]{x_1 * x_2 * \dots * x_n}$$

Generalmente se emplea este promedio cuando se trabaja con observaciones en las que cada una guarda una razón aproximadamente constante respecto a la anterior, y siempre la media será mayor que la media geométrica.

Las medidas de dispersión miden el grado de agregación, de concentración y de variabilidad de los datos.

- *Rango:* La medida de dispersión más simple es el rango. Se define como la diferencia entre la mayor y la menor observaciones de la muestra. Si $x_{\text{máx}}$ es la observación de mayor valor y $x_{\text{mín}}$ el valor de la observación mínima, el rango valdrá:

$$\text{rango} = x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}$$

- *Varianza:* La medida de dispersión más conocida y de mayor utilidad es la varianza. Se define como el promedio aritmético de los cuadrados de las desviaciones de las observaciones con respecto a su valor medio.

Si $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son los valores observados de la variable aleatoria x correspondientes a una muestra de tamaño n obtenida de una población, y \bar{x} es la media de la muestra, la varianza, representada por s_x^2 , es:

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

Algunos autores consideran como denominador de la expresión de s_x^2 a $(n-1)$ en lugar de la n . Esto es debido a que así se obtiene un estimador insesgado de la variancia de la población. Sin embargo, cuando la muestra es grande, o sea, $n > 30$, no existen diferencias apreciables en considerar uno u otro denominador.

- *Desviación Típica:* Se define como la raíz cuadrada de la varianza, y también es un tipo de promedio de las desviaciones de los puntos respecto a su media.

$$s_x = \sqrt{s_x^2}$$

Las medidas de asimetría y de apuntamiento establecen criterios para comparar el histograma de la muestra con respecto al histograma de una distribución normal.

- *Coefficiente de asimetría (Sesgo):* Se dice que una distribución empírica es simétrica, cuando su histograma tiene un eje vertical de simetría. En este caso, la media, mediana y moda coinciden con ese eje de simetría, como se muestra en la Figura 2.15. (a).

En una distribución empírica asimétrica, los valores de la media, mediana y moda son diferentes entre sí. En este caso, la moda subsiste en el rectángulo más alto del histograma, ya que no se ve afectada por las observaciones poco frecuentes que distorsionan la simetría del histograma.

La posición de la mediana estará algo alejada de la moda, en la dirección de los valores inusuales, dividiendo en dos partes el área del histograma.

Como la media es la que se ve más afectada por los valores extremos, quedará localizada más lejos de la moda en la misma dirección de los valores poco frecuentes. Esto se representa en los casos (b) y (c) de la Figura 2.15., en donde se ha llamado asimetría positiva o derecha al caso de tener datos poco frecuentes a la derecha de la moda que hagan que se prolongue el histograma en esa dirección, y asimetría negativa o izquierda al caso contrario.

De lo anterior puede establecerse que una medida de la asimetría de una distribución empírica puede ser la diferencia entre la media y la moda, ya que a mayor asimetría, le corresponde una mayor diferencia.

Dado que la medida de la asimetría se utiliza principalmente con fines comparativos, conviene que la propuesta sea adimensional, y que los valores grandes de la media sean debidos a gran asimetría y no a gran dispersión de los datos.

Se dividirá la diferencia de la media y la moda entre la desviación estándar de la muestra. A este cociente se le llama el primer coeficiente de asimetría de Pearson; vale cero cuando la distribución es simétrica y diferente de cero cuando es asimétrica.

$$\text{coeficiente de asimetría} = \frac{\bar{x} - \hat{x}}{s_x}$$

En el caso de distribuciones moderadamente sesgadas, existe una relación aproximada entre los diversos promedios:

$$\bar{x} - \hat{x} = 3 * (\bar{x} - \tilde{x})$$

Es interesante destacar que en el caso de las distribuciones asimétricas con cúspide muy aguda, la mediana constituye a menudo una útil medida de tendencia central.

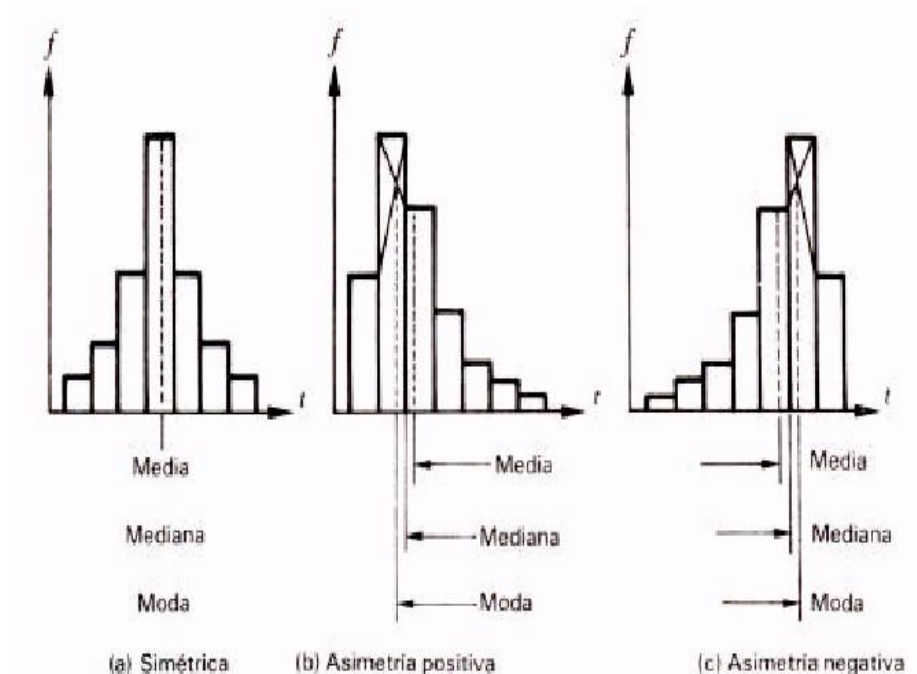


Figura 2.15. Histogramas de frecuencias relativas que muestran los diferentes tipos de asimetría.

Existen otras formas de medir la asimetría de una distribución empírica, concepto de momento de muestra que a continuación se establece:

Se llama momento de orden r con respecto a la media de una muestra de valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ de media \bar{x} a:

$$m_r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^r}{n}$$

Una medida de la asimetría de una distribución empírica, llamada el coeficiente momento de asimetría, está dada por el tercer momento con respecto a la media expresado en forma adimensional. Esta es:

$$a_3 = \frac{m_3}{\sqrt{(m_2)^3}}$$

- *Coeficiente de Apuntamiento (Kurtosis)*: A una distribución empírica cuyo histograma siga la tendencia de la gráfica de la distribución normal se dice que es mesocúrtica; si es más alta y estrecha que ésta es leptocúrtica, y si es más ancha y baja se le llama platocúrtica. En la Figura 2.16. se muestran histogramas correspondientes a los tres tipos de apuntamiento mencionados.

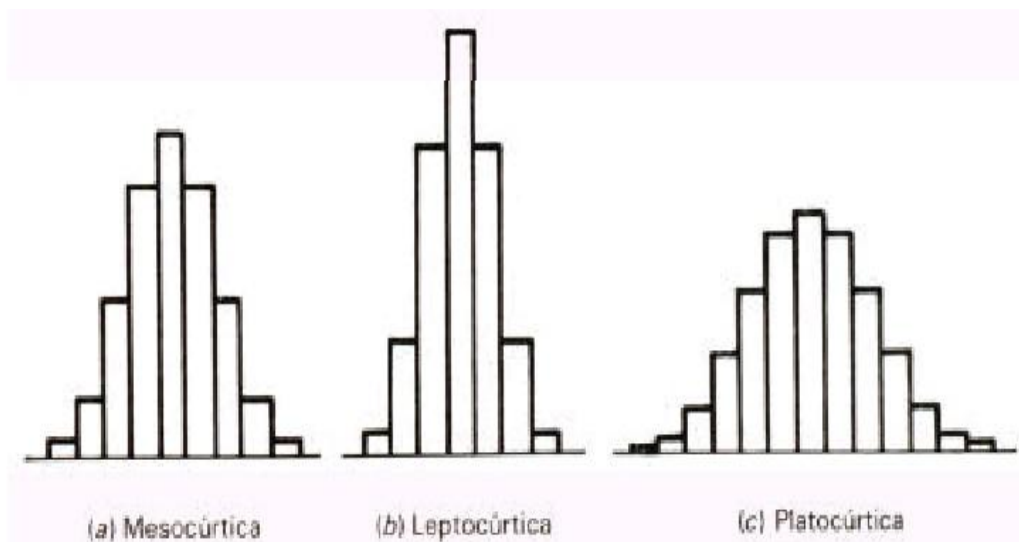


Figura 2.16. Histogramas de frecuencias que muestran los diferentes tipos de apuntamiento.

El grado de apuntamiento de una distribución empírica se llama kurtosis y se mide a través del cuarto momento con respecto a la media expresado en forma adimensional. Al coeficiente momento de kurtosis, está definido por:

$$a_4 = \frac{m_4}{m_2^2}$$

el cual vale 3 en una distribución mesocúrtica, es mayor de 3 en distribuciones leptocúrticas y menor de 3 en platocúrticas.

Otras medidas son:

- *Valor de pico:* Máxima amplitud de la señal, registrada en el tiempo de observación T, siendo este positivo o negativo.
- *Valor de pico a pico:* Separación entre los máximos, positivos y negativos de la señal registrada en el tiempo T.
- *Valor medio:* El valor medio se calcula empleando la ecuación siguiente.

$$\text{Valor medio} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) * dt$$

- *Valor eficaz:* se calcula según la expresión:

$$\text{Valor eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} x^2(t) * dt}$$

- Valor cuadrático medio o potencia media de la señal:

$$P = |x(t)^2|$$

- *Factor de forma:* Se define como el cociente entre el valor eficaz y el valor medio con signo positivo.
- *Factor de cresta:* Representa el cociente entre el valor de pico y el valor eficaz.



2. ANALISIS DE SEÑALES UTILIZANDO LA TRANSFORMADA WAVELET

Es posible analizar cualquier señal empleando una técnica alternativa llamada análisis multirresolución (MRA). El MRA analiza una señal para diferentes frecuencias con diferentes resoluciones. Cada componente espectral no se resuelve de idéntica forma como en el caso de la STFT.

El análisis multirresolución está diseñado para proporcionar una buena resolución temporal y pobre resolución en frecuencia para altas frecuencias y buena resolución en frecuencia y baja en tiempo para bajas frecuencias.

2.1. Aspectos básicos de la transformada Wavelet

Esta técnica se desarrolló como un método alternativo para superar los problemas de resolución de la STFT, haciendo posible una buena representación de una señal tanto en tiempo como en frecuencia de forma simultánea, con lo que se puede interpretar el intervalo de tiempo en el cual aparecen determinados componentes espectrales.

Básicamente lo que hace la transformada Wavelet es filtrar una señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso alto y paso bajo que eliminan ciertas componentes de alta o baja frecuencia de la señal. El procedimiento se repite para señales resultantes del proceso de filtrado anterior.

La STFT por la WT, puesto que la STFT trabaja con una resolución fija para todos los tiempos, mientras que la WT trabaja con una resolución variable.

Resumiendo, existen dos diferencias principales entre la STFT y la WT:

La transformada de Fourier de las señales no es calculada.

La anchura de la ventana se cambia conforme la transformada se calcula para cada componente espectral.

Con la WT las altas frecuencias tienen mejor resolución en el tiempo mientras que las bajas frecuencias tienen mejor resolución en el dominio de la frecuencia. Esto significa que una determinada componente de alta frecuencia puede localizarse mejor en el tiempo (con un menor error relativo) que una componente de baja frecuencia. Por el contrario, una componente de baja frecuencia puede localizarse mejor en frecuencia comparado con una componente de alta frecuencia.

En la Figura 2.17. a) puede observarse que a altas frecuencias (fila superior) la cantidad de puntos es mayor para un mismo intervalo de tiempo (Δt); es decir, las altas frecuencias tienen una mejor resolución en el tiempo. Sin embargo, a bajas frecuencias para el mismo intervalo de tiempo existen muchos menos puntos que caracterizan la señal, por lo tanto las frecuencias bajas no tienen buena resolución en el tiempo.

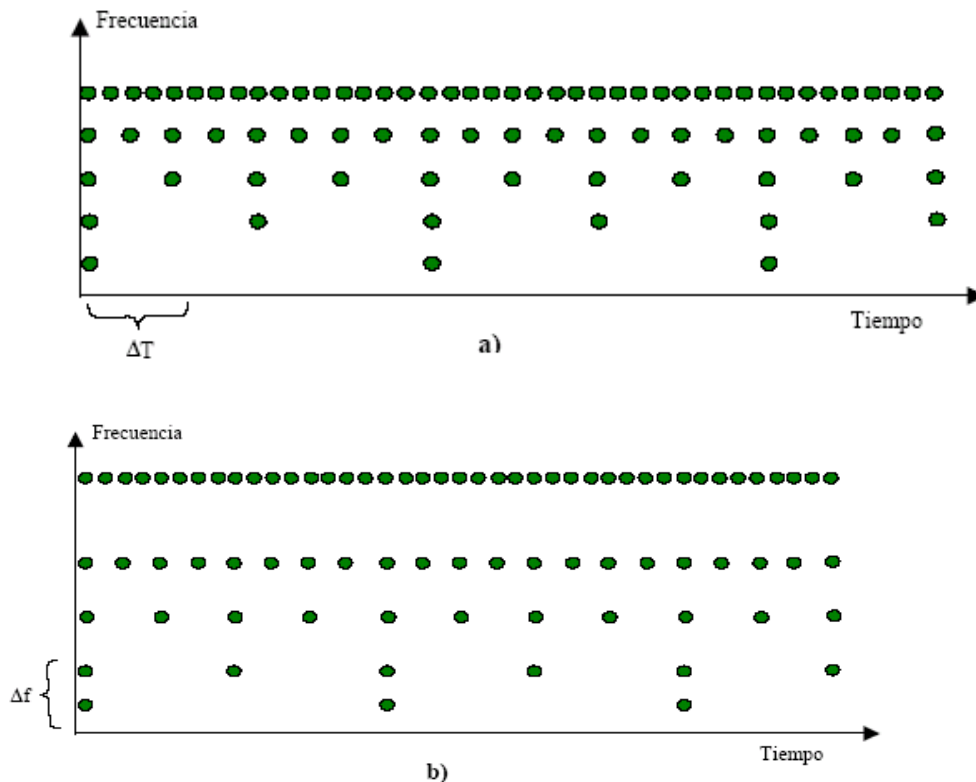


Figura 2.17. Interpretación gráfica de la resolución en el tiempo y en la frecuencia.

2.2. La Transformada Wavelet

El análisis Wavelet se efectúa de manera similar al análisis STFT, en el sentido que la señal es multiplicada por una función (función Wavelet) de manera similar a la función ventana en la STFT, y la transformada se calcula separadamente para distintos segmentos de la señal en el dominio del tiempo. Sin embargo, existen dos diferencias principales entre la STFT y la CWT:

No se evalúa la transformada de Fourier de las señales ventana y por lo tanto aparecerá un único pico que corresponde a una senoide.

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El ancho de la ventana varía a medida que se evalúa la transformada para cada componente del espectro.

La transformada Wavelet continua se define como:

$$C(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot \psi_{\tau, s}^*(t) dt$$

donde:

$$\psi_{\tau, s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right)$$

Como se observa en la ecuación anterior, la señal transformada es una función de dos variables, τ y s , los parámetros de translación y escala respectivamente.

$\psi_{\tau, s}(t)$ es la función de transformación que se le denomina “Wavelet madre”, este nombre deriva de dos importantes propiedades del análisis Wavelet:

El término Wavelet significa “onda pequeña”. Se refiere al hecho que esta función ventana es de longitud finita y el término onda se refiere a la naturaleza oscilatoria de esa señal, es decir, la Wavelet madre es un prototipo para generar las otras funciones ventana.

Tabla 2.2.- Transformaciones básicas aplicadas al cálculo de la WT. La transformación finalmente corresponde a la aplicación de las dos primeras, translación y cambio de escala.

Traslación	Cambio de escala	Traslación y cambio de escala
$\psi(t - b)$	$\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t}{a}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t - b}{a}\right)$

Las wavelets vienen definidas según un eje de tiempo continuo. El número indica la cantidad de momentos de desvanecimiento.

TRASLACIÓN

El término translación se usa en el mismo sentido en el que ya fue utilizado para la STFT y está relacionado con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a través de la señal. Obviamente, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado. Sin embargo, no se tiene un parámetro que sea la frecuencia como antes se tenía en el caso de la STFT.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el caso de la transformada Wavelet se tiene un parámetro de “escala” que se relaciona con la frecuencia como:

$$Escala = \frac{1}{frecuencia}$$

El término frecuencia está reservado para la STFT. En la siguiente sección se define con más detalle el parámetro escala.

ESCALA

En el análisis Wavelet el parámetro escala es análogo con el parámetro escala de los mapas. Tal como en este último caso, las altas escalas corresponden a una visión global no detallada de la señal y las bajas escalas corresponden a una visión detallada. De igual manera, en términos de frecuencia, las bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a una información global de la señal que comúnmente abarca toda la señal, mientras que las altas frecuencias (escalas bajas) corresponden a una información detallada de una característica oculta en la señal que comúnmente dura un tiempo relativamente pequeño.

CONJUNCIÓN DE TRASLACIÓN Y ESCALA

En señales que corresponden a fenómenos o aplicaciones reales las escalas bajas (altas frecuencias) no tienen una larga duración en la señal, sino que aparecen de tiempo en tiempo como picos o “spikes”. Sin embargo, las altas escalas (bajas frecuencias) comúnmente duran todo el tiempo que permanece la señal.

El escalamiento como operación matemática produce una dilatación o compresión de la señal; las altas escalas corresponderán a señales dilatadas y las escalas pequeñas corresponden a señales comprimidas. Todas las señales mostradas en la figura surgen de la misma señal coseno, es decir son señales comprimidas o dilatadas de la misma función. En la figura anterior, para $s=0.05$ se tiene la menor escala y para $s=1$ la mayor.

En términos de funciones matemáticas, si $f(t)$ es una función dada $f(st)$ corresponderá a una versión contraída (comprimida) de $f(t)$ si $s>1$ y a una versión expandida (dilatada) de $f(t)$ si $s<1$.

Sin embargo, en la definición de transformada Wavelet, el término de escalamiento aparece en el denominador y por tanto la situación es la opuesta a la descrita en el párrafo anterior; es decir, escalas $s>1$ dilatan la señal, mientras que escalas $s<1$ comprimen la señal.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La relación entre la escala y la frecuencia consiste en que las escalas menores corresponden a altas frecuencias y las escalas mayores corresponden a bajas frecuencias.

Debido a que la WT incluye información relacionada con el tiempo y la frecuencia, la representación gráfica de esta transformada se realiza en un plano tiempo-escala, representado en la figura 2.17. Cada celda en esta figura representa un valor de la WT en dicho plano. Es de destacar el hecho de que estas celdas tienen un área no nula, lo cual indica que no es posible conocer el valor de un punto en particular. Sin tener en cuenta las dimensiones de las celdas, sus áreas, tanto en la STFT como en la WT, son las mismas y están determinadas por el principio de incertidumbre de *Heisenberg*.

En concreto, el área de cada celda se fija mediante la función de enmarcado temporal en la STFT o por la Wavelet madre en la CWT (Transformada Wavelet Continua), con lo que diferentes ventanas o funciones madre dan lugar a diferentes áreas. Sin embargo, todas las áreas tienen una cota inferior dada por $\pi/4$.

Es importante indicar cómo se representarían las divisiones de la Figura 2.4. en el caso de la STFT, para ello debe recordarse que en la STFT la resolución en el tiempo y en la frecuencia quedan determinadas por el ancho y la función ventana, lo que se selecciona una sola vez durante todo el análisis, por lo que la resolución tanto en el tiempo como en la frecuencia permanecen constantes, en otras palabras, la representación de las particiones de la Figura 2.18. en el plano tiempo-frecuencia para el caso de la STFT se haría mediante divisiones cuadradas.

Independientemente de las dimensiones de cada división, las superficies de éstas tanto para el caso de la STFT como para el caso de la WT son iguales y están determinadas por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Es decir, el área de cada división es fija para cada función ventana (STFT) o para cada Wavelet madre (CWT), aún cuando diferentes ventanas o wavelets madres o pueden representar diferentes áreas; el área de éstas divisiones no se puede reducir todo lo que se desee debido al principio de incertidumbre de Heisenberg, pero, para una Wavelet madre dada, el tamaño de las divisiones se puede variar manteniendo constante la superficie, de hecho, esto es exactamente lo que hace la transformada Wavelet.

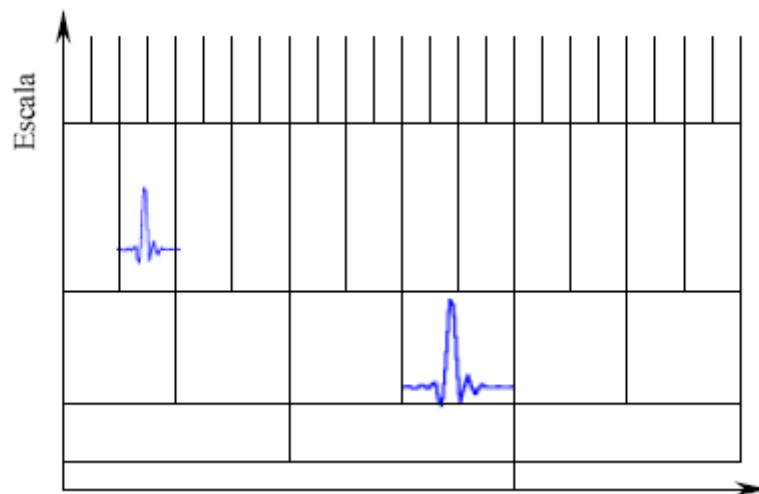


Figura 2.18. Representación de las particiones, en el plano tiempo-escala para el caso de la Transformada Wavelet.

En caso de tener una buena resolución temporal, la Wavelet madre, representada en el eje inferior, se estrecha, con lo que se refiere resolución en la frecuencia. Si la Wavelet madre se ensancha, se pierde la resolución en el tiempo, pero se gana en la frecuencia. Así, variando la anchura y desplazándola por el eje temporal, se calcularía el valor correspondiente a cada celda.



Figura 2.19. Dimensiones de las celdas en el plano tiempo-frecuencia (escala) para la STFT y la Transformada Wavelet.

En la Figura 2.19. se observa cómo para la STFT la anchura de la celda es fija, mientras que para la TW varía en función de la frecuencia.

En la Figura 2.20. se observan las operaciones de escalado y traslación para distintas posiciones del plano tiempo-frecuencia. Se puede comprobar cómo obtendremos distintas resoluciones según la posición en dicho plano. La Wavelet mostrada tiene distinto tamaño en las diversas posiciones del plano debido a las operaciones de traslación y escala.

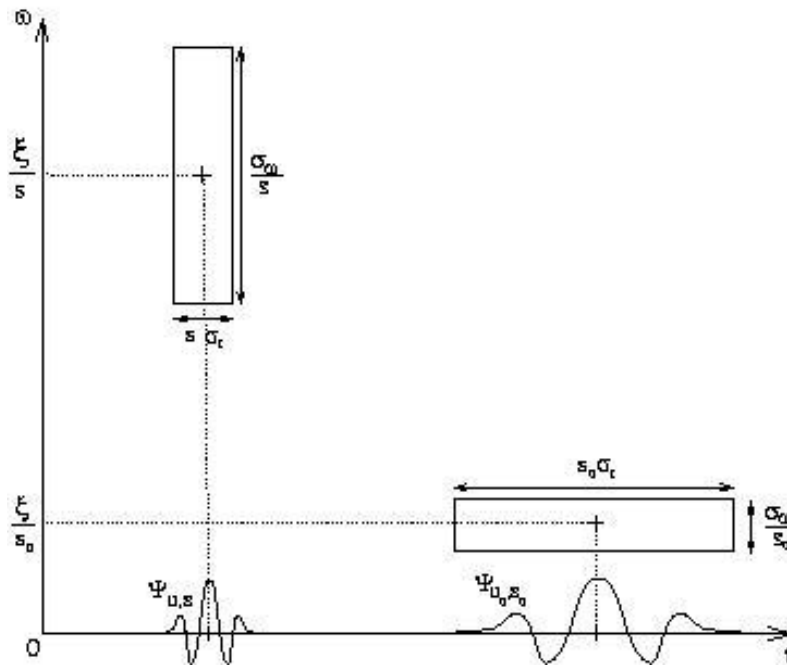


Figura 2.20. Tamaño de la Wavelet para distintas posiciones en el plano escala-tiempo.

2.3. Relación entre escala y frecuencia

Una pregunta muy común cuando estudiamos wavelets es, ¿cuál es la relación entre escala y frecuencia? Anteriormente hemos comentado que escala y frecuencia se relacionan inversamente, pero no conocíamos los parámetros exactos que relacionan ambos conceptos.

Desgraciadamente no podemos responder de manera única a esta pregunta, en lugar de frecuencia sería más correcto hablar de una pseudo-frecuencia distinta para cada escala y cada tipo de Wavelet.

La pseudo-frecuencia se puede calcular como:

$$F_a = \frac{F_c}{a \cdot \Delta}$$

donde:

a es la escala.

Δ es el periodo de muestreo.

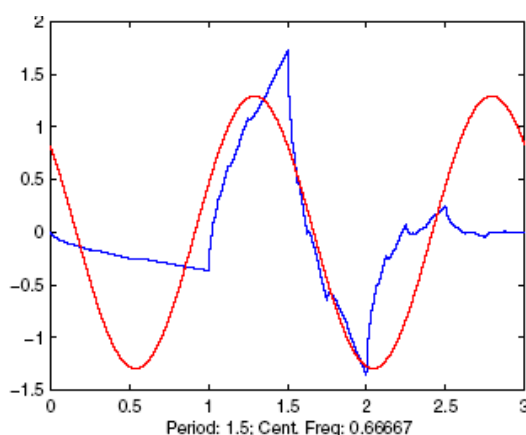
F_c es la frecuencia central de la Wavelet en hertzios.

F_a es la pseudo-frecuencia correspondiente a la escala **a** en hertzios.

DETECCIÓN DE LA FRECUENCIA CENTRAL DE LA WAVELET

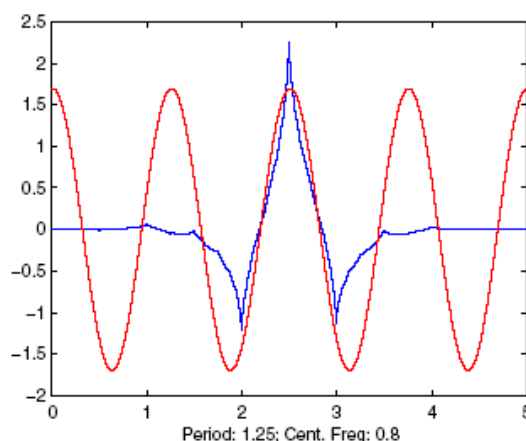
La idea es asociar a la Wavelet dada una señal sinusoidal pura de frecuencia F_c . Como se muestra a continuación la frecuencia central capta las principales oscilaciones de la Wavelet. Así, la frecuencia central es una simple caracterización del dominio en frecuencia de la Wavelet.

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos de qué es la F_c y como se calcula en una Wavelet:



db2

Figura 2.21. Detección de la frecuencia central de la Wavelet db2 mediante el comando de Matlab® scal2frq.



coif1

Figura 2.22. Detección de la frecuencia central de la Wavelet Coiflet 1

INFLUENCIA DEL PERIODO DE MUESTREO

Como se mencionó anteriormente el parámetro Δ es el periodo de muestreo (intervalo en que se descompone la señal para ser analizada). Cuanto menor sea el intervalo, mayor será el número de puntos a computar y la pseudo-frecuencia disminuirá linealmente

Para una señal senoidal de 20 Hz, utilizando la Wavelet “Daubechies 4” y un valor de $\Delta=0.001$, se observa que la franja central con unos valores de correlación más altos corresponde a escala 40.

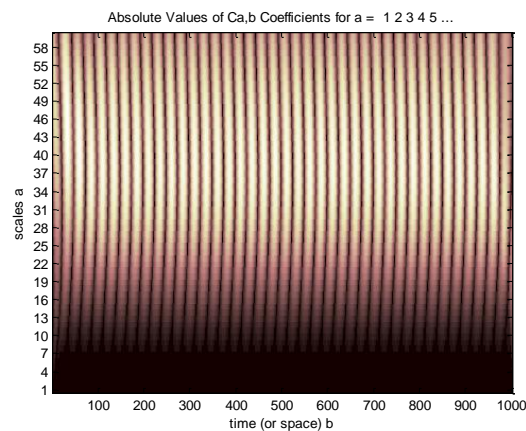


Figura 2.23. CWT de una señal de 20 hertzios con un periodo de muestreo seleccionado de $\Delta=0.001$ ms.

Si cambiamos el valor de Δ a $\Delta=0.01$, además de perder información debido a que disminuye la resolución, la franja central se sitúa en 4. Es decir, como la relación indicaba si multiplicamos Δ por un factor de 10, la escala se divide por el mismo factor.

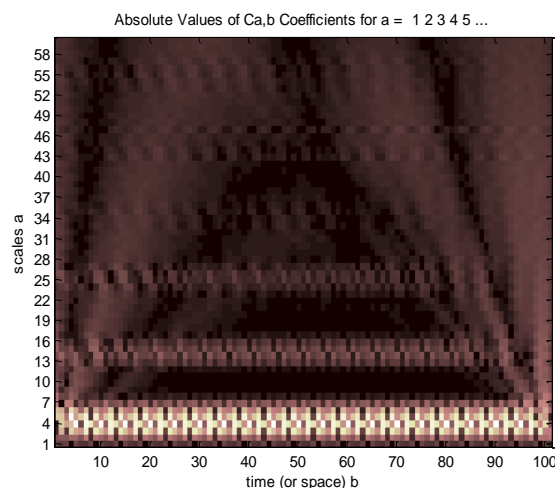


Figura 2.24. CWT de una señal de 20 hertzios con un periodo de muestreo seleccionado de $\Delta=0.01$ ms.



FRECUENCIA CENTRAL PARA LOS PRINCIPALES TIPOS DE WAVELETS

A partir de la fórmula mencionada anteriormente, se muestra una correspondencia única entre la pseudo-frecuencia o frecuencia. Para un valor de escala determinado, sería sencillo calcular la frecuencia en hertzios que le corresponde conociendo simplemente la frecuencia central de la Wavelet y el parámetro Δ .

A continuación mostramos una tabla con las frecuencias centrales de las principales Wavelet que han sido calculadas mediante el comando de Matlab® “scal2frq”.

Tabla 2.3. Valor de las frecuencias en las Wavelet Daubechies.

Daubechies	Frecuencia central (segundos)
Haar	0.9961
Db2	0.6667
Db3	0.8000
Db4	0.7143
Db5	0.6667
Db6	0.7273
Db7	0.6923
Db8	0.6667
Db9	0.7059

Tabla 2.4. Valor de las frecuencias en las Wavelet Symlet.

Symlet	Frecuencia central(segundos)
Sym1	0.9961
Sym2	0.6667
Sym3	0.8000
Sym4	0.7143
Sym5	0.6667
Sym6	0.7273
Sym7	0.6923
Sym8	0.6667

Tabla 2.5. Valor de las frecuencias en las Wavelet Coiflet.

Coiflet	Frecuencia central (segundos)
Coif1	0.8000
Coif2	0.7273
Coif3	0.7059
Coif4	0.6957
Coif5	0.6897

Tabla 2.6. Valor de las frecuencias en las Wavelet Biortogonales.

Biortogonales	Frecuencia central (segundos)
Bior1.3	0.8006
Bior1.5	0.7781
Bior2.2	1.0008
Bior2.6	0.9234
Bior3.3	1.0006
Bior4.4	0.7781
Bior5.5	0.6366
Bior6.8	0.7649

Tabla 2.7. Valor de las frecuencias en las Wavelet Morlet, Mexican Hat y Meyer.

	Frecuencia central (segundos)
Morlet	0.8125
Mexican Hat	0.2500
Meyer	0.6902

2.4. Tipos de transformada Wavelet

Existen tres tipos de transformada Wavelet: continua (CWT), semidiscreta (SWT) y discreta (DWT). La diferencia entre ellas radica principalmente en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados. A continuación se describen brevemente estos tres tipos.

TRANSFORMADA WAVELET CONTINUA

Este tipo de transformada se ha descrito en el apartado 2.2. En este caso los parámetros cambian de manera continua. Esta representación ofrece la máxima libertad en la elección de la Wavelet, con la única restricción de que satisfaga la condición de media nula. Esta condición permite que la CWT sea invertible en rango. La transformada inversa viene dada por:

$$f(t) = \frac{1}{K_{\psi}} \iint C(\tau, s) \frac{\psi(\tau, s)}{\tau^2} \cdot d\tau \cdot ds$$

donde ψ satisface la condición de media nula comentada anteriormente, con K_{ψ} dada:

$$K_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(w)|^2}{w} \cdot dw < \infty$$



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

siendo $\psi(w)$ la transformada de Fourier de $\psi(t)$.

Desde un punto de vista intuitivo, la CWT consiste en calcular un índice de semejanza entre la señal que está siendo analizada, y la Wavelet.

El proceso de cálculo de la CWT se ejecuta en cuatro pasos:

- 1.-Seleccionar una Wavelet madre.
- 2.-Dados dos valores de τ y s , calcular un coeficiente (τ, s) mediante las ecuaciones anteriores que represente la correlación entre la Wavelet y la sección de la señal bajo análisis. Cuanto mayor sea éste, mayor es la similitud, con lo cual es interesante resaltar que los resultados dependerán de la forma Wavelet elegida.
- 3.-Desplazar la Wavelet en el sentido positivo del eje temporal, y repetir los pasos anteriores hasta que se haya cubierto la totalidad de la señal.
- 4.-Escalar la Wavelet en el tiempo y repetir los pasos 1 al 3.

TRANSFORMADA WAVELET SEMIDISCRETA

En la práctica, es más conveniente considerar la WT en algunos valores discretos de a y b . Por ejemplo, la escala diádica corresponde a la definición de los parámetros $a=2^j$, $b=2^k$, con $(j,k) \in \mathbb{Z}^2$ denominándose transformada Wavelet semidiscreta (SWT).

La transformada será reversible si cumple:

$$A|f|^2 \leq \sum_{a,b} \left| \langle f, \psi(\tau, s) \rangle \right|^2 \leq B|f|^2$$

donde A y B son dos constantes positivas y $f(t)$ sigue siendo una función continua.

TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Sea la señal a analizar $f[n]$ una función discreta. En este caso la transformada Wavelet de esta señal viene dada por:

$$C[j,k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f[n] \psi_{j,k}[n]$$

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Donde $\psi_{j,k}$ es una Wavelet discreta definida como:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-\frac{j}{2}} \cdot \psi[2^{-2j}n - k]$$

Los parámetros τ, s están definidos según la escala diádica, de manera que $\tau=2^j$, $s=2^j k$, con la diferencia respecto a la SWT que la señal bajo estudio es discreta. La transformada inversa se define de forma similar como:

$$f[n] = \sum_z \sum_z C[j,k] \cdot \psi_{j,k}[n]$$

Si son constantes, entonces la transformada es ortogonal. Estas wavelets pueden ser construidas mediante un análisis multirresolución, que se comentará en el tercer capítulo.

2.5. Aplicaciones de la transformada Wavelet

El análisis Wavelet es capaz de revelar aspectos que otras técnicas de análisis de señal no mostrarían, aspectos como puntos de discontinuidad y de ruptura, discontinuidad en derivadas más altas y semejanza de la función por partes. Además, debido a su diferente forma de representar los datos respecto a las técnicas tradicionales, el análisis Wavelet puede comprimir o eliminar el ruido de una señal sin degradación apreciable.

En su breve historia dentro del campo de procesamiento de señales, las Wavelet han probado que son una herramienta indispensable para los analistas y hoy día disfrutan de una popularidad que avanza con el tiempo.

DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES Y PUNTOS DE RUPTURA

Una de las ventajas principales que nos permite el análisis Wavelet es trabajar en un análisis local, esto es, su capacidad para analizar un área pequeña de una señal más grande.

Consideremos una señal sinusoidal con una pequeña discontinuidad, una tan pequeña que resulta difícilmente visible a simple vista. Una señal así sería fácil encontrarla en el mundo real, quizás por una fluctuación o una pequeña aparición de ruido.

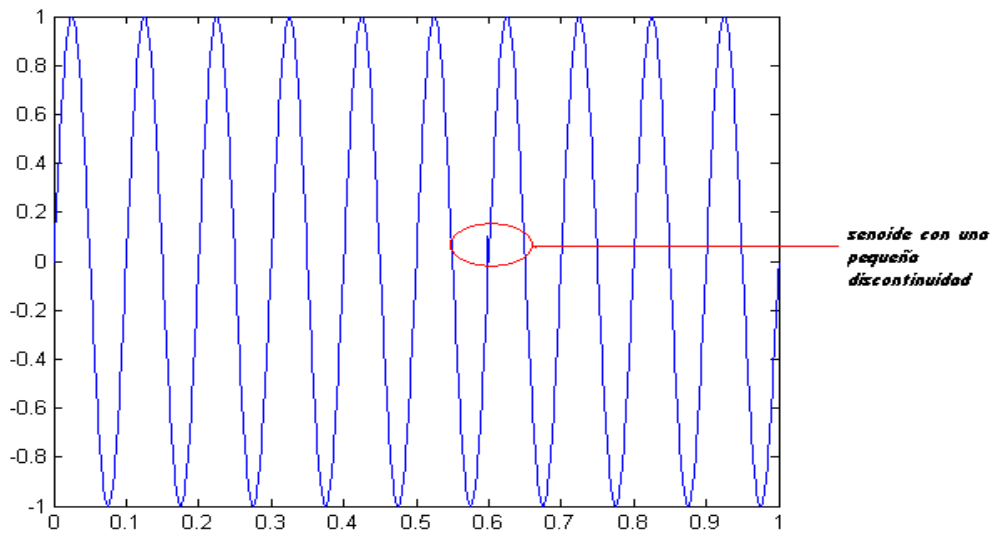


Figura 2.25. Señal sinusoidal con una pequeña discontinuidad.

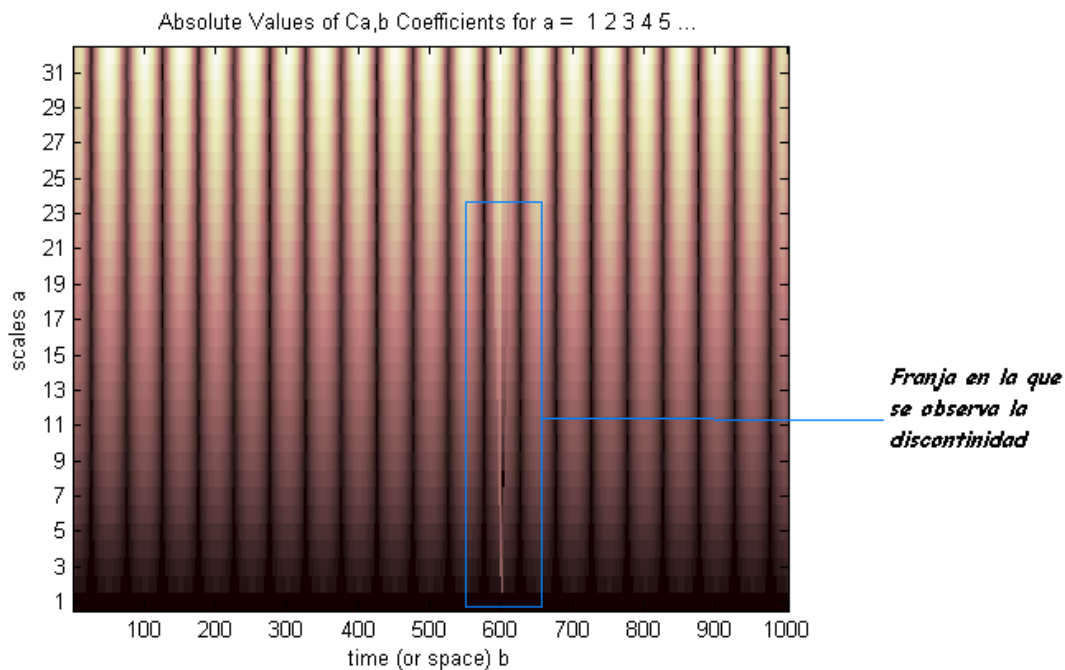


Figura 2.26. Representación de los coeficientes mediante la CWT de la señal de la figura 5.1.

Si representáramos los coeficientes de Fourier de esta señal no se mostraría nada especialmente interesante, un espectro con un pico a la frecuencia de la señal. Sin embargo, una representación gráfica de los coeficientes Wavelet muestra claramente el instante de tiempo exacto donde se produce la discontinuidad.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.6. Clasificación y tipos de Wavelets

Las Wavelets son familias de funciones que se encuentran en el espacio y se emplean como funciones de análisis, examinan la señal de interés para obtener sus características de espacio, tamaño y dirección; la familia está definida por:

$$\psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad \text{donde } \tau, s \in \mathbb{R}, s \neq 0.$$

y son generadas a partir de funciones madre $\psi(t)$. A esa función madre se le agregan un par de variables que son la escala (s) que permite hacer dilataciones y contracciones de la señal y la variable de translación (τ), que nos permite mover la señal en el tiempo. Estas variables son números reales y obviamente para una escala de cero la función se indetermina. Las wavelets se utilizan en el procesamiento de señales por sus características.

Existen diferentes wavelets que ya son utilizadas de forma constante y que tienen definiciones establecidas. Sin embargo, la elección de un tipo de Wavelet depende de la aplicación específica que se le vaya a dar. Actualmente existen muchos estudios en los que las wavelets actúan de manera directa, de acuerdo con Kobayashi las patentes en Estados Unidos durante el periodo de 1991 a 2001 bajo la palabra Wavelet aumentaron de 3 a 128, lo que permite hacernos una idea de la utilidad que tendrán y lo que se puede esperar de ellas en el futuro.

CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN

Hay diferentes tipos de familias Wavelets cuyas propiedades varían según algunos criterios. Las principales formas de clasificación son:

Que sean compatibles con la función ψ : la velocidad de convergencia a cero de estas funciones ($\psi(t)$ ó $\psi(w)$) cuando el tiempo t o la frecuencia w tienden a infinito, que cuantifica tanto las localizaciones de tiempo como de frecuencia. La función ψ define a forma de la Wavelet.

La simetría, que es útil para evitar el desfase en el procesamiento de señales e imágenes.

El número de momentos de desvanecimiento para ψ o para Φ (si existe), estos momentos son útiles si nuestro propósito es comprimir la señal.

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La regularidad, que es útil para conseguir rasgos agradables, como la suavidad de la señal reconstruida o imagen, y para la función estimada en análisis de regresión no lineal.

Estas características se asocian a dos características que permiten la codificación rápida del algoritmo y que son:

- La existencia de función escala Φ (scaling function).
- La ortogonalidad o biortogonalidad de los análisis resultantes.

También pueden estar asociadas con las siguientes propiedades menos importantes:

- La existencia de una expresión explícita.
- La facilidad de la tabulación.
- La familiaridad con el uso.

FAMILIA DAUBECHIES

Wavelet Haar (o Daubechies 1.)

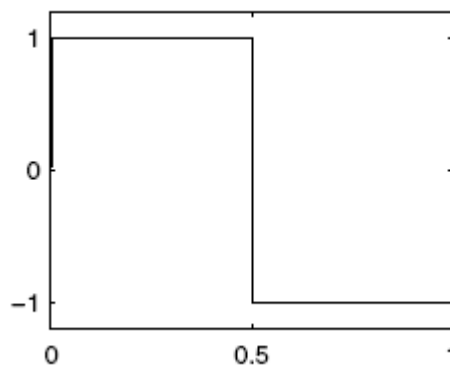


Figura 2.27. Wavelet Haar.

La función matemática que representa la Wavelet Haar, se representa como sigue:

$$\begin{array}{lll} \psi(t) = 1 & \text{si} & t \in [0, 0.5] \\ \psi(t) = -1 & \text{si} & t \in [0.5, 1] \\ \psi(t) = 0 & \text{si} & t \notin [0, 1] \end{array}$$



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Función de escala:

$$\begin{array}{lll} \phi(t) = 1 & \text{si} & x \in [0,1] \\ \phi(t) = 0 & \text{si} & x \notin [0,1] \end{array}$$

La Wavelet Haar pertenece a la familia de Wavelet Daubechies, con un solo momento de desvanecimiento, por tanto en muchas bibliografías es también denominada como “db1”.

Sin embargo, por su forma diferente al resto y algunas características peculiares podemos considerarla como una Wavelet única, que está aparte del resto de la familia Daubechies. Es una función muy sencilla pero a pesar de ello se utiliza mucho para el análisis de señales usando transformadas discretas y continuas.

La función Haar, cumple los requisitos de ortogonalidad y biortogonalidad, se puede comprimir y es válida tanto para la representación de una señal mediante la transformada Wavelet discreta y la transformada Wavelet continua. Es simétrica, pero no regular y admite soporte compacto.

Por su particular forma es muy utilizada para la detección de discontinuidades y puntos de ruptura.

Daubechies N

Estas funciones no poseen una expresión explícita que las defina.

La mayoría de las funciones wavelets están agrupadas en familias que presentan unas características comunes, y de un número de orden, que en el caso de la familia Daubechies, indica la cantidad de momentos de desvanecimiento. Así la función conocida como Daubechies 3, representa a la familia Daubechies tiene tres momentos de desvanecimiento.

Si N es el número de orden de la Wavelet, la longitud de la ventana tanto para las funciones ψ y Φ es de $(2N-1)$, por tanto admite soporte compacto.

Todas las Wavelet de esta familia presentan una serie de características comunes, como son ortogonalidad y biortogonalidad.

La mayoría no son simétricas, en algunas de ellas la asimetría es muy pronunciada.

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Todas estas funciones presentan la característica de que la regularidad va aumentando con el orden y se pueden utilizar para calcular transformadas continuas y discretas con ellas.

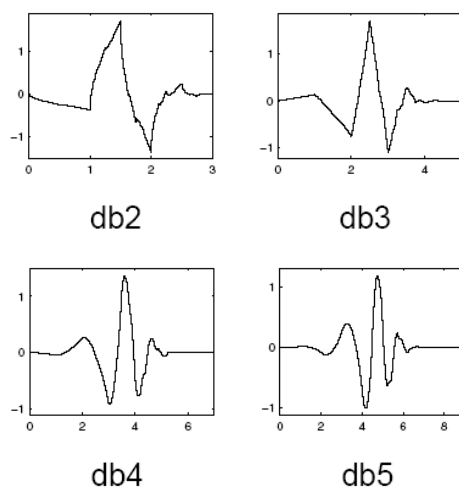


Figura 2.28. Wavelets db2, db3, db4 y db5 pertenecientes a la familia Daubechies.

En la Figura 2.29. se muestran las Wavelet de la familia daubechies de índice más alto.

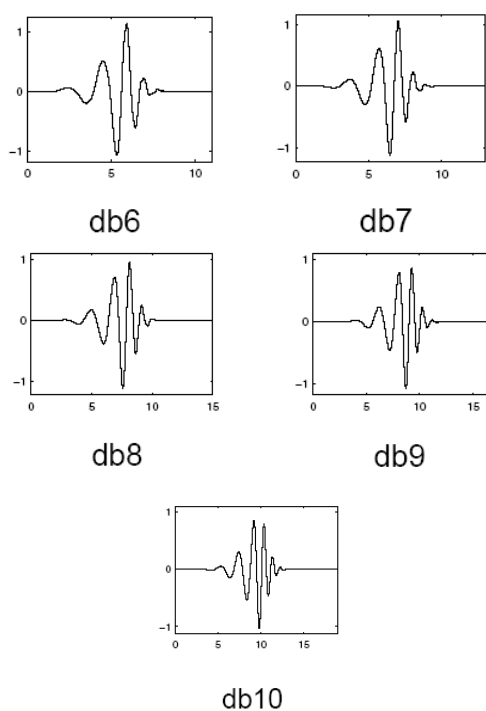


Figura 2.29. Wavelets db6, db7, db8, db9 y db10 pertenecientes a la familia Daubechies.

BIORTOGONALES

Las biortogonales son Wavelet simétricas.

Esta familia posee la propiedad de fase lineal, que es necesaria para la reconstrucción de señales e imágenes. Cada biortogonal posee dos representaciones, como se muestra en las siguientes figuras. Esta característica las diferencia del resto de familias Wavelet. La imagen que se sitúa a la izquierda se utiliza para la descomposición y la de la derecha para la reconstrucción. De esta forma las propiedades útiles para el análisis se pueden concentrar en una parte (por ejemplo, detectar oscilaciones) mientras que las propiedades interesantes para la síntesis se concentran en la otra (por ejemplo, la regularidad).

Son, como su nombre indica, biortogonales pero no ortogonales.

Las biortogonales están definidas por dos coeficientes separados por un punto. Admite representaciones con DWT y CWT.

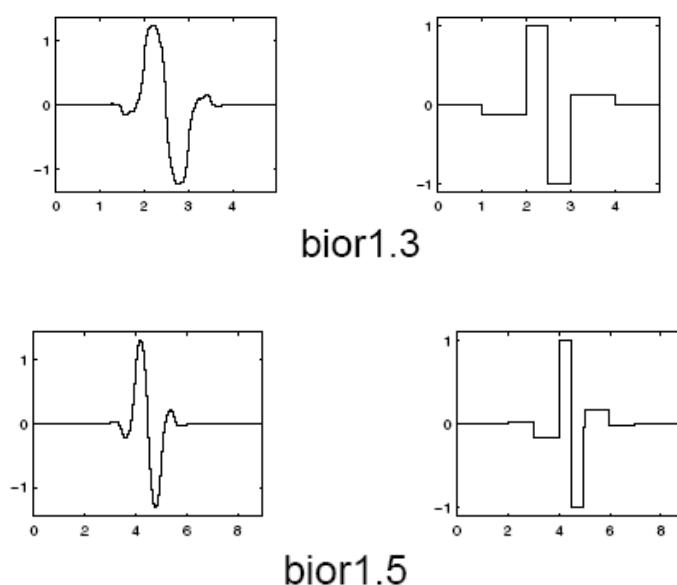


Figura 2.30. Principales tipos de Wavelet biortogonales de índice 1.

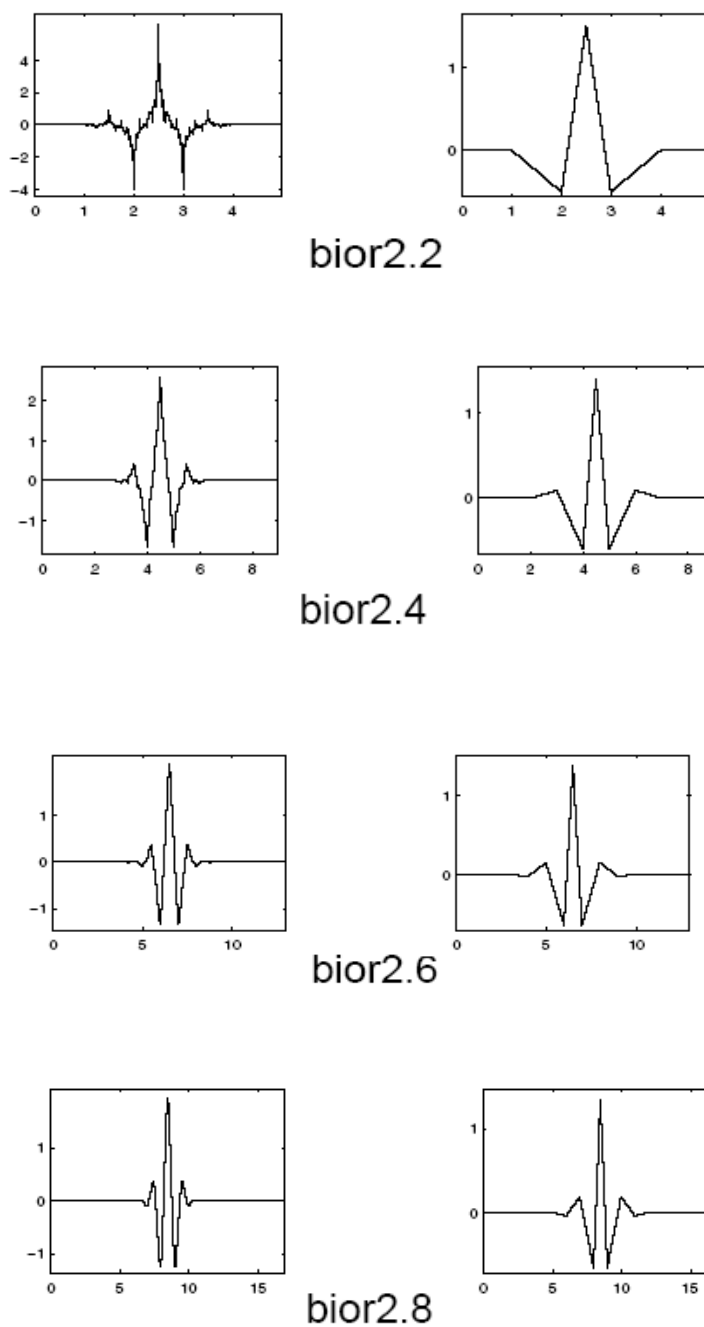


Figura 2.31. Principales tipos de Wavelet biortogonales de índice 2.

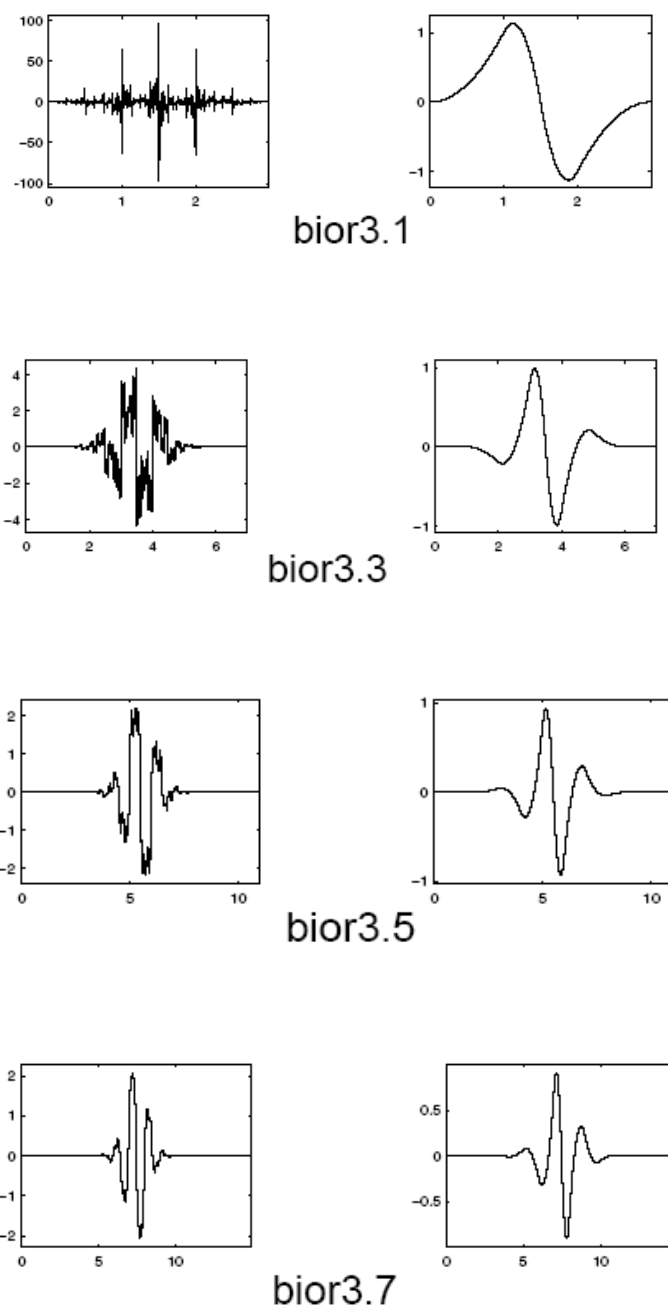


Figura 2.32. Principales tipos de Wavelet biortogonales de índice 3.

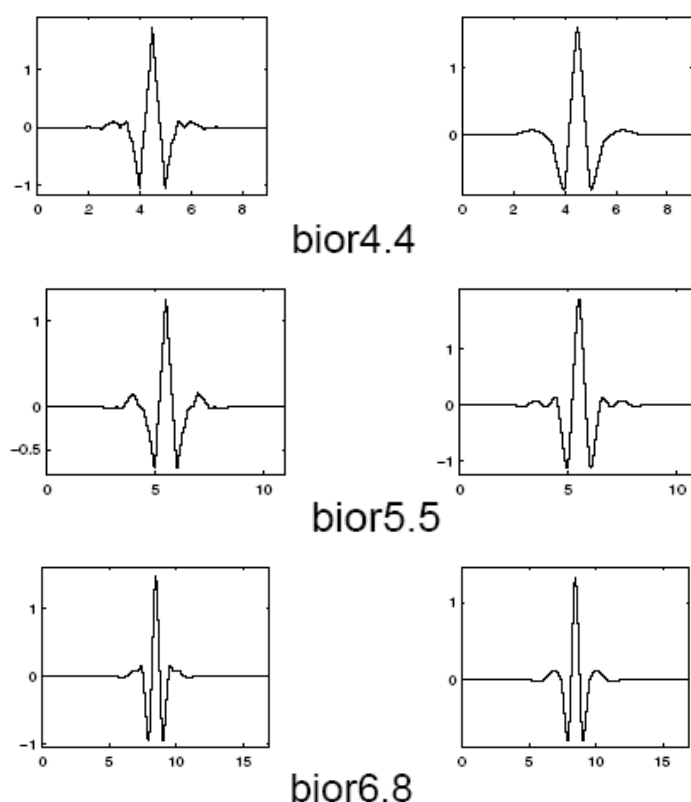


Figura 2.33. Principales tipos de Wavelet biortogonales de índices 4, 5 y 6.

COIFLETS

Las coiflets fueron construidas por I. Daubechies a petición de R.Coifman.

Estas funciones presentan una anchura de $(6N-1)$ y son mucho más simétricas que las Daubechies.

Son las wavelets con mayor número de momentos de desvanecimiento, ya que para cada orden diferente de la Wavelet se tienen $2N$ momentos de desvanecimiento. Son ortogonales y biortogonales, aptas para la representación con CWT y DWT. Poseen la característica que son bastante similares entre sí. Mientras en otras familias como las Daubechies al aumentar el orden la Wavelet se va modificando mucho, en estas la forma apenas varía.

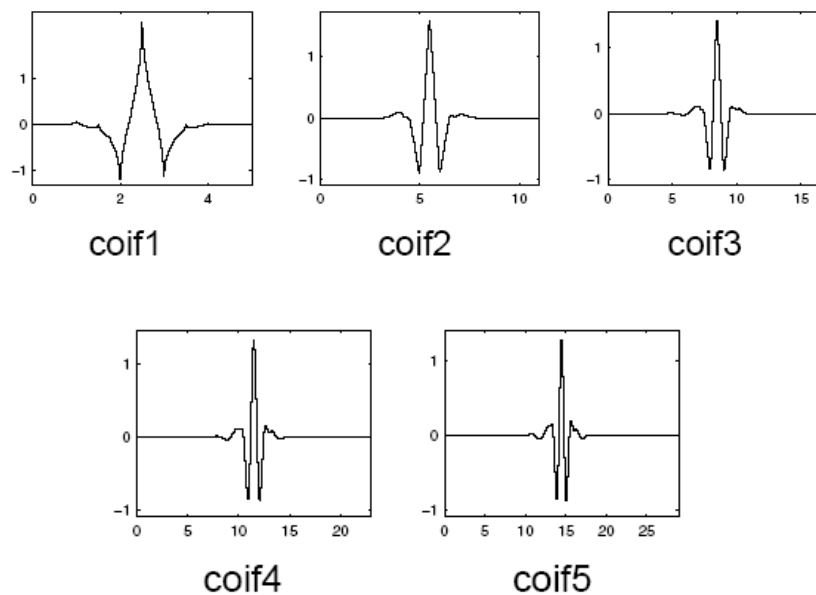


Figura 2.34. Familia de las Wavelet Coiflets

SYMLETS

Las symlets son una familia de wavelets con características muy similares a las daubechies, especialmente las de orden bajo que son casi idénticas.

La mayoría de las symlets no son funciones simétricas, pero se aproximan mucho a la simetría.

Las symlets surgen a propuesta de Daubechies, que propuso modificaciones en sus wavelets que incrementaran su simetría y mantuvieran gran simplicidad.

Cumplen las condiciones de ortogonalidad y biortogonalidad, y permiten realizar las transformadas continua y discreta. La anchura de la ventana es igual a $(2N-1)$, donde el número N que acompaña a la symlet indica los momentos de desvanecimiento que presenta. Según aumente el orden de la symlet aumentará su regularidad.

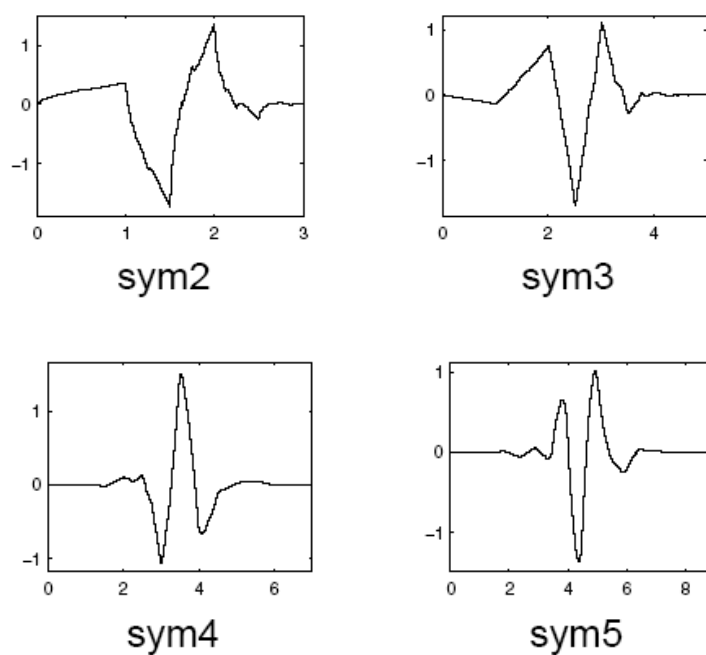


Figura 2.35. Wavelets sym2, sym 3, sym 4 y sym 5 pertenecientes a la familia Symlet.

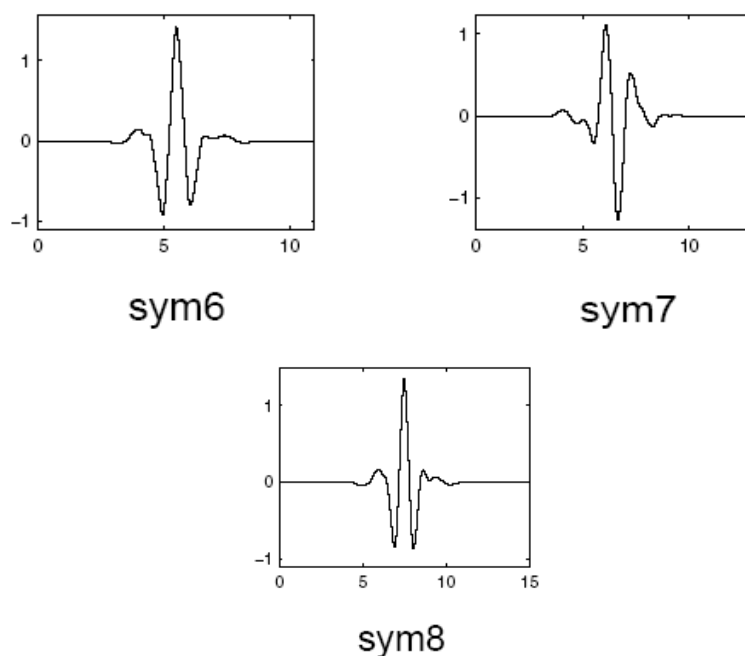


Figura 2.36. Wavelets sym2, sym 3, sym 4 y sym 5 pertenecientes a la familia Symlet.

MORLET

La Wavelet morlet viene definida por la siguiente fórmula:

$$\psi(x) = C \cdot e^{-x^2/2} \cos(5x)$$

La constante C se utiliza para la normalización en la gráfica.

La Wavelet Morlet no satisface exactamente la condición de admisibilidad.

La función Morlet no posee características de ortogonalidad y biortogonalidad. Es simétrica. No admite representación con la DWT pero sí sería posible con la CWT.

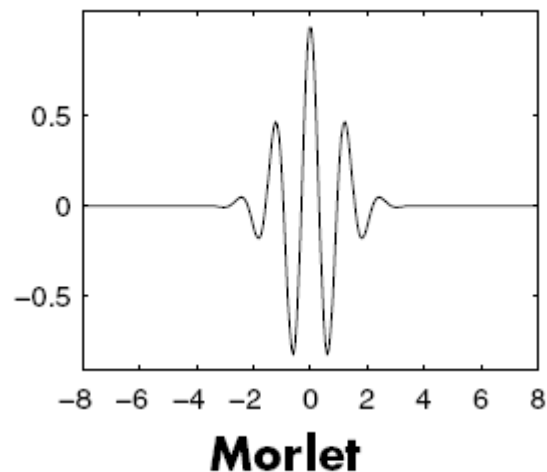


Figura 2.37. Wavelet Morlet.

MEXICAN HAT O SOMBRERO MEXICANO

Esta Wavelet es la representación de la segunda derivada de la función de probabilidad gaussiana.

Su algoritmo puede escribirse como:

$$\psi(x) = \left(\frac{2\pi}{3} \pi^{-1/4} \right) (1 - x^2) \cdot e^{-x^2/2}$$

No es ortogonal ni biortogonal, ya que la función Φ no existe.

No se puede utilizar el análisis DWT y sí el CWT.

Es una Wavelet simétrica.

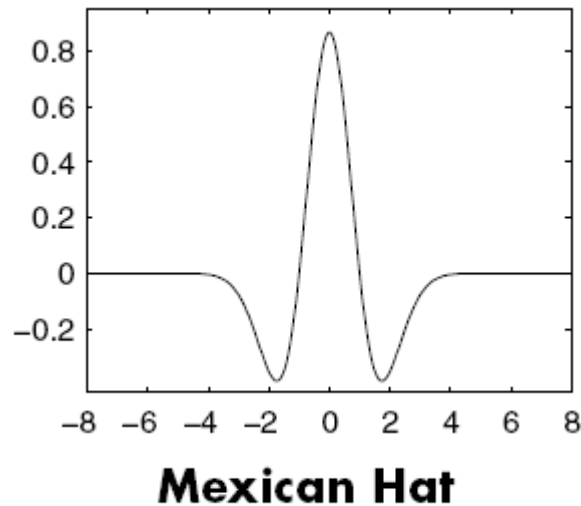


Figura 2.38. Wavelet Mexican Hat o sombrero mexicano.

MEYER

La Wavelet Meyer está definida en el dominio y en el tiempo:

$$\begin{aligned} \psi(w) &= (2\pi)^{-1/2} \cdot e^{i\omega/2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} v\left(\frac{3\pi}{2}|\omega| - 1\right)\right) & \text{si } \frac{2\pi}{3} \leq |w| \leq \frac{4\pi}{3} \\ \psi(w) &= (2\pi)^{-1/2} \cdot e^{i\omega/2} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} v\left(\frac{3\pi}{4}|\omega| - 1\right)\right) & \text{si } \frac{4\pi}{3} \leq |w| \leq \frac{8\pi}{3} \\ \text{y } \psi(w) &= 0 & \text{si } |w| \notin \left[\frac{2\pi}{3}, \frac{8\pi}{3}\right] \\ \text{donde a } v(a) &= a^4(35 - 84a + 70a^2 - 20a^3), & a \in [0,1] \end{aligned}$$

La función Meyer es simétrica, permite la representación la CWT y DWT pero sin FWT (transformada Wavelet rápida). Además es indefinidamente derivable.

Cumple con las condiciones de ortogonalidad y biortogonalidad.

No admite soporte compacto, pero ψ tiende a cero cuando t tiende a infinito.

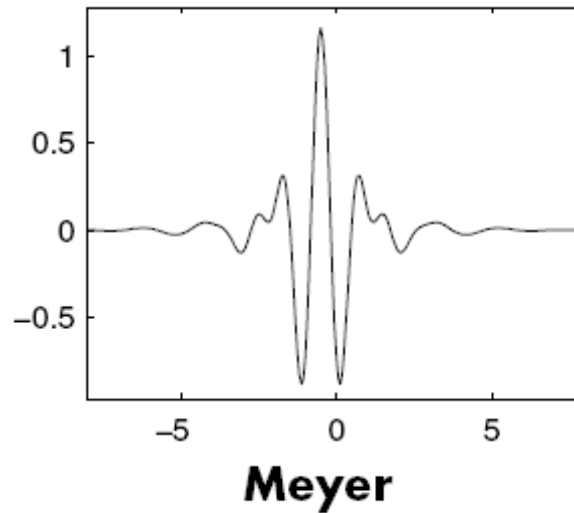


Figura 2.39. Wavelet Meyer.

3. DEFECTOLOGÍA EN MAQUINAS

La técnica más utilizada para analizar los posibles defectos que se presentan en los diferentes componentes de una máquina es el análisis de la señal de vibración. Lo más habitual y extendido es estudiarlas en el campo de la frecuencia, esto es así porque suele ser la representación más característica y aclaratoria.

Obteniendo el espectro de vibración de una máquina y conocidas sus frecuencias características, se puede saber si tiene fallos, a qué componente son debidos, en qué forma y cómo evoluciona el estado de desarrollo del defecto en función de su magnitud.

Otra herramienta que puede ser útil es el diagrama de espectro en cascada, en el cual se representa en el eje de abscisas la frecuencia y en el eje de ordenadas se situará la velocidad de giro de la máquina y la amplitud de la vibración. Este diagrama será útil en el análisis en el proceso de arranque, es así ya que en este proceso de aceleración hasta conseguir el régimen de revoluciones de operación se pasa por la frecuencia de resonancia del sistema a analizar, pudiendo obtener en este caso mayor información.

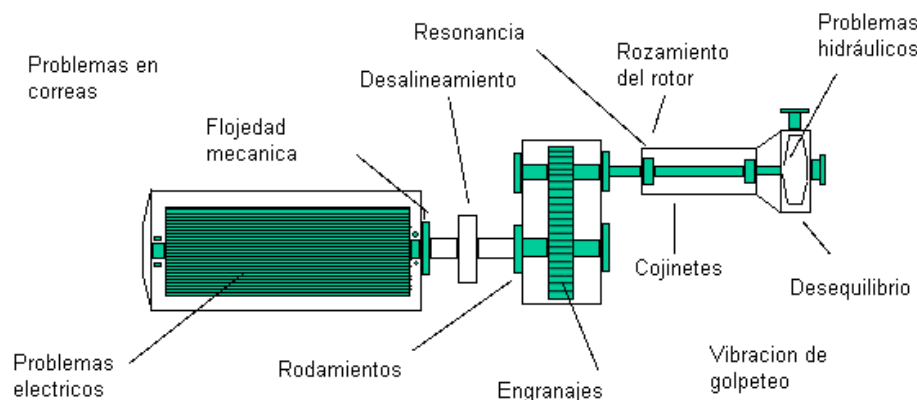


Figura 2.40. Principales componentes de una máquina.

3.1. Desequilibrio

Es la causa más común de vibraciones como consecuencia de las tolerancias en el ensamblaje y de la propia anisotropía del material.

Se produce cuando el centro geométrico de cualquier sección en rotación no coincide con el centro de masas, con lo que el eje de giro no coincide con el eje principal de inercia.

La vibración se manifiesta como un pico a una frecuencia igual a la de rotación de la máquina 1x. La amplitud es proporcional a la cantidad de desequilibrio.

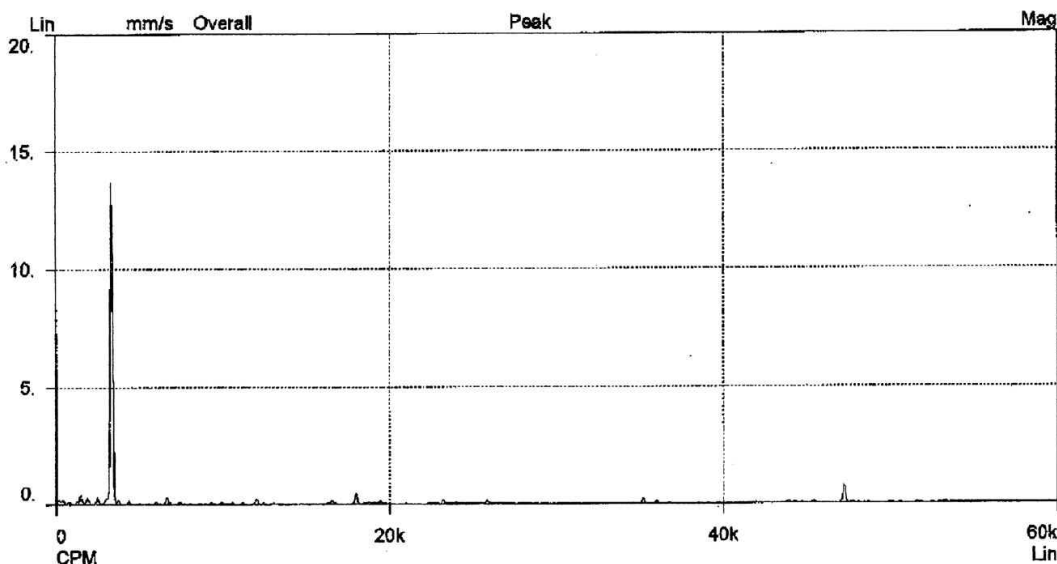


Figura 2.41. Espectro típico del desequilibrio en una máquina.

Normalmente la amplitud de vibración es mayor en sentido radial que en sentido axial del eje.

Para analizar la señal de vibración es importante también la experiencia y conocimiento de la máquina aparte de los datos tomados, ya que cuando aparece una frecuencia igual a 1x puede ser debido a diferentes causas, no sólo al desequilibrio, por ejemplo, el desalineamiento también produce picos a esta frecuencia y, por otro lado, puede ser debido a engranajes, poleas excéntricas, eje torcido, correas en mal estado, resonancias o problemas eléctricos.

Se destacan:

- *Desequilibrio de fuerzas.* Será en fase y constante, la amplitud debida al desequilibrio aumentará según el cuadrado de la velocidad, el pico a 1x se representa siempre y suele predominar en el espectro. Para corregirlo se puede colocar un peso de equilibrado en un plano en el centro de gravedad del rotor.

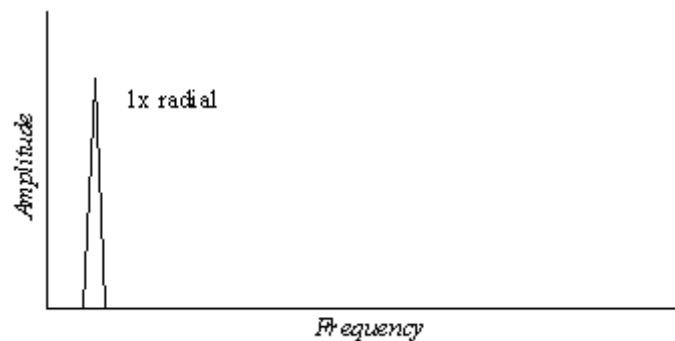


Figura 2.42. Espectro de vibración debido al desequilibrio de fuerzas.

- *Desequilibrio del acoplamiento.* Los acoplamientos desequilibrados tienden a un desfase de 180° en el mismo eje. La amplitud variará según el cuadrado de la velocidad debido a que es una fuerza inercial ($F = m r \omega^2$). Puede causar tanto vibración axial como radial. Para corregirlo será necesario colocar pesos de equilibrado al menos en dos planos. La representación gráfica de este fenómeno es similar al anterior (Figura 2.42.).
- *Desequilibrio del rotor en voladizo.* Este desequilibrio causa una alta vibración axial y radial de 1x. Los rotores en voladizo suelen tener desequilibrios de fuerza de acoplamiento cada uno de los cuales necesitará corrección por separado.



Figura 2.43. Espectro debido a desequilibrio de rotor en voladizo.

- *Rotor excéntrico.* La excentricidad ocurre cuando el centro de rotación se sale de la línea central geométrica de una polea o engranaje, de un cojinete, etc. La vibración ocurre a 1x del componente excéntrico en la dirección de los centros de los rotores.

El intento de equilibrio de éste tipo de rotores origina una disminución de la vibración en una dirección radial pero al aumento en la axial.

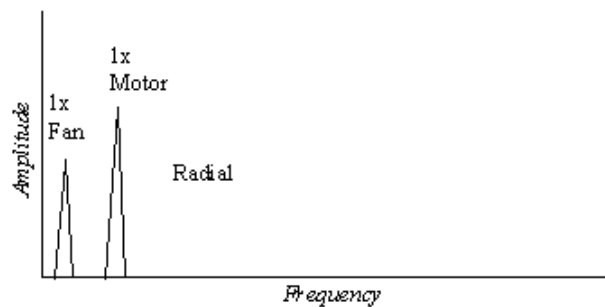


Figura 2.44. Espectro debido a un rotor excéntrico.

- *Eje torcido.* Provocan alta vibración axial con tendencia a una diferencia de fase axial de 180° en el mismo componente de la máquina. La vibración predominante es normalmente 1x si la parte torcida se sitúa cerca del centro del eje mientras que si está más cerca del acoplamiento será de 2x.

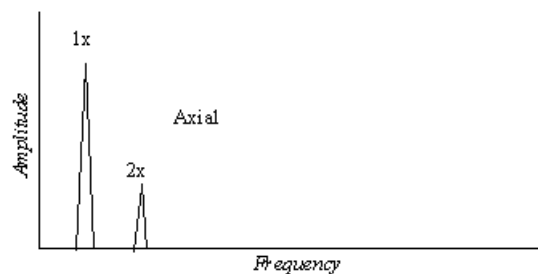


Figura 2.45. Espectro debido a un eje torcido.

3.2. Desalineamiento de ejes

Es la segunda anomalía más frecuente dentro de las máquinas rotativas, esto es debido a la dificultad de alinear ejes y sus rodamientos de forma que no se originen fuerzas que produzcan vibraciones. La amplitud será proporcional a la gravedad del defecto.

Entre sus características principales está la importancia de la vibración axial correspondiente a la componente horizontal, en la cual resulta claramente identificable la vibración en la frecuencia $2x$, que tendrá un valor del orden de la mitad o más del de la componente $1x$, siendo en ocasiones mayor al de esta última.

La relación entre las magnitudes de estos picos puede ser usada como un indicador de la severidad del desalineamiento.

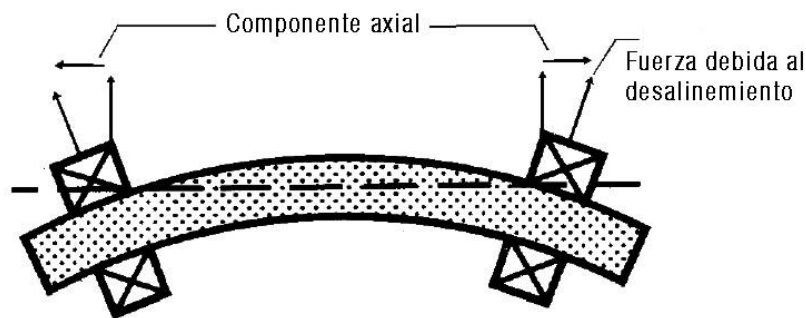


Figura 2.46. Esquema de un eje desalineado, el cual produce un alto nivel de vibración axial.

Debido a que el desalineamiento es un proceso unidireccional la respuesta $1x$ no será de la misma amplitud en las direcciones vertical y horizontal, como sucede en el desequilibrio, por lo que se obtienen diferentes espectros en función de donde se coloque el transductor. También pueden aparecer diversos armónicos superiores

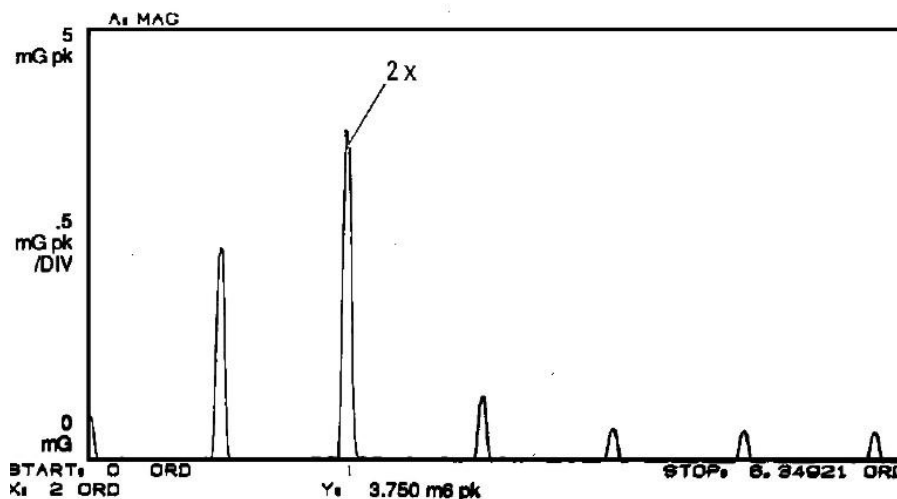


Figura 2.47. Los problemas de desalineamiento se caracterizan por presentar un pico a 2 veces la velocidad de rotación.

Al realizar un diagrama de espectro en cascada se obtiene un máximo de amplitud de vibración en la componente $1x$, coincidiendo con la frecuencia de resonancia. También se tendrá un máximo de amplitud de vibración en la componente $2x$, coincidiendo con la frecuencia de resonancia y con la mitad de su valor.

Se diferencian tres tipos de desalineamiento principales.

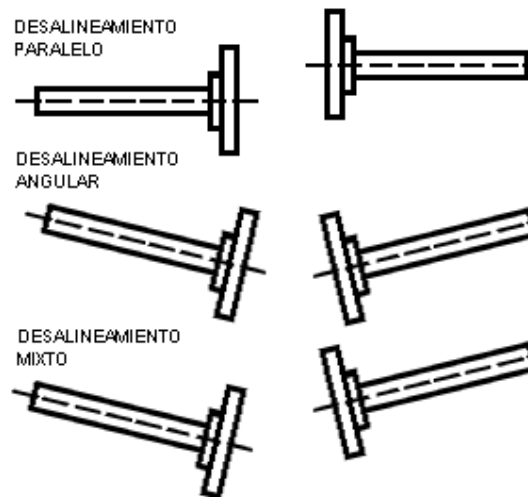


Figura 2.48. Tipos de desalineamiento.

- *Desalineamiento paralelo.* La falta de alineación en paralelo produce sobre todo vibración en dirección radial con frecuencia igual al doble de la velocidad de giro del eje, su altura relativa a $1x$ está a menudo marcada por el tipo de acoplador y su montaje.

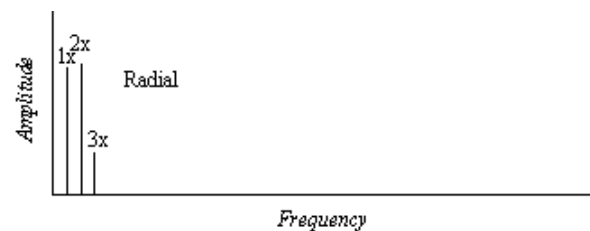


Figura 2.49. Espectro de frecuencia debido al desalineamiento paralelo.

- *Desalineamiento angular.* La falta de alineación angular produce una vibración en dirección axial en los dos ejes a una frecuencia igual a $1x$. No es raro que aparezcan también $2x$ y $3x$ que pueden ser, también en este caso, indicadores de problemas en los acopladores.

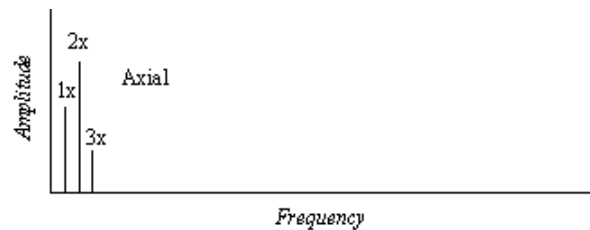


Figura 2.50. Espectro de frecuencia debido al desalineamiento angular.

- *Cojinete desalineado con el eje.* Un cojinete mal alineado con el eje provocará una vibración axial importante, el intento de alineación del acoplador o el equilibrado del rotor no solventan el problema. La solución válida es desmontar el cojinete y volver a montarlo correctamente. Este fallo lleva consigo la aparición de ruido en la máquina

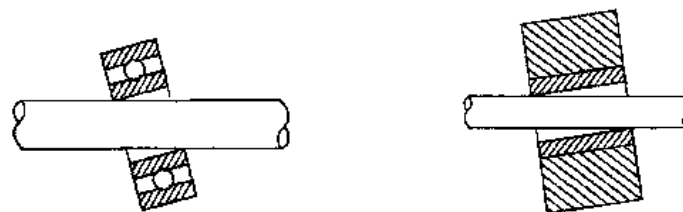


Figura 2.51. Rodamiento y casquillo mal alineados respecto del eje.

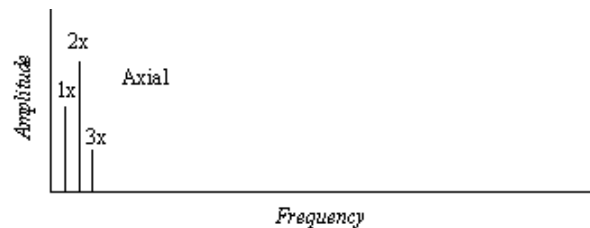


Figura 2.52. Espectro de frecuencia debido al desalineamiento entre cojinete y su eje.

3.3. Engranajes

Este defecto se detecta al encontrar picos a frecuencias que coinciden con múltiplos enteros de la velocidad de giro del engranaje que falla, además existe vibración de menor amplitud. En la Figura 2.53. se observan unos picos importantes a frecuencias que son múltiplos de la velocidad de giro del piñón. De forma simétrica a estos picos hay otros de valores pequeños y separados una distancia igual a la velocidad de giro.

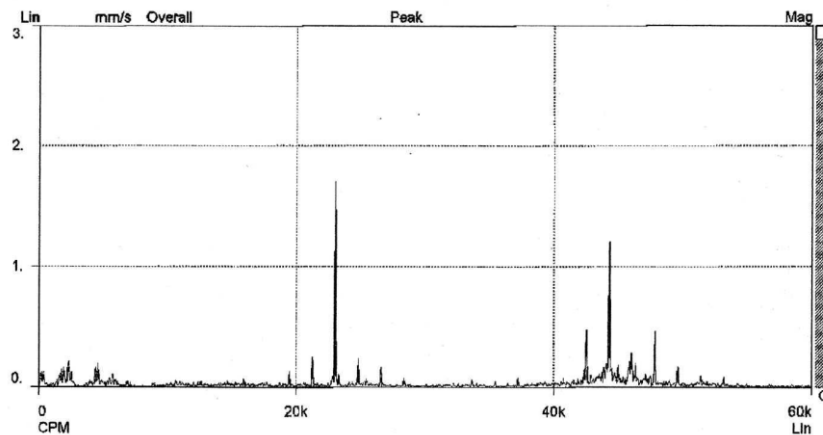


Figura 2.53. Espectro de velocidad debido a un problema de engranaje.

Causas más comunes:

- 1.-Desgaste excesivo de los dientes
- 2.-Inexactitud de los dientes
- 3.-Fallos de lubricación
- 4.-Elementos extraños entre dientes.

Las vibraciones causadas por este tipo de defectos pueden ser detectadas en diferentes puntos de las máquinas. Esa característica diferenciará la gráfica de vibración representativa de un engranaje con poca carga de la producida por un rodamiento, esto es así porque el diagrama de amplitud frente a frecuencia con una carga de piñón baja podría dar lugar a confusión con la de un rodamiento.

Este fallo lleva consigo la aparición de ruido en la máquina.

Hay que tener en cuenta que ya de por sí un engranaje en funcionamiento correcto produce una vibración importante, por lo que conviene tener un espectro del engranaje nuevo para poder comparar.

Los diversos tipos de problemas (como desalineamiento, desgaste de dientes...) se reflejan como bandas laterales de la frecuencia fundamental de fallo del engranaje.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta frecuencia fundamental y los valores de sus armónicos identifican la causa de la vibración, mientras que las amplitudes de las bandas laterales respecto de la fundamental nos muestran la severidad del problema.

3.4. Rodamientos

Hoy en día los rodamientos tienen una vital importancia en el funcionamiento de la maquinaria, como elemento de máquina indispensable para evitar la fricción entre dos piezas que tienen movimiento relativo en una o más direcciones, con un mínimo de rozamiento. El fenómeno de fricción entre eje y alojamiento es una circunstancia que no se puede evitar, pero es posible reducirla al mínimo siempre que entre el eje y el alojamiento se interponga un elemento especial, cuya misión será de reducir la fricción y facilitar el giro relativo.

Estos órganos o elementos que facilitan el movimiento entre un eje o árbol y su soporte reciben el nombre de cojinetes anti-fricción o rodamientos, ya que el principio bajo el que funcionan es el de rodadura. Existen otros tipos de cojinetes que también facilitan el giro relativo entre dos elementos, son los llamados cojinetes de deslizamiento, pero estos funcionan bajo un principio distinto al del rodamiento (en estos, las superficies en movimiento relativo tienen contacto deslizante al estar separados por una película lubricante).

Los rodamientos se encuentran entre los componentes más importantes en la inmensa mayoría de las máquinas, esto es debido a que son los elementos que suelen presentar un mayor número de intervenciones en un cierto período de tiempo. Esta gran cantidad de intervenciones se produce porque es a través del rodamiento como se canalizan todos los esfuerzos estáticos y dinámicos del conjunto de la máquina.

Aunque, a nivel económico es un producto caro, nos ahorra mucho tiempo y dinero (si está bien diseñado su uso y correctamente realizado su montaje). Cada rodamiento debe llevar asociado un mantenimiento predictivo que informe cuando es necesaria su sustitución, ya que es mucho más costoso tener que parar las máquinas para su sustitución que su propio coste, corriendo el riesgo adicional de que su avería pueda producir fallos en otros elementos de la máquina.

Los rodamientos se suelen usar como soportes para los ejes en los que la carga principal se transmite mediante fuerzas giratorias y no lineales. Se pueden emplear tanto para soportar cargas radiales como axiales o para una combinación de ambas.

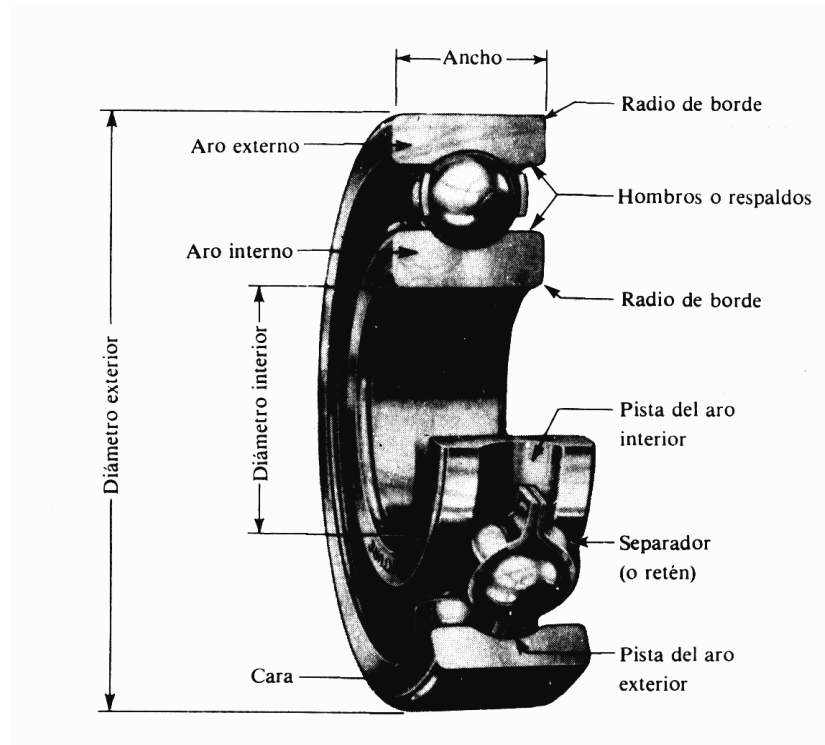


Figura 2.54. Sección de un rodamiento de bolas en el que se indican sus partes fundamentales

En la Figura 2.54. se pueden observar los elementos principales de un rodamiento de bolas, así como algunos de los parámetros que definen dicho rodamiento. Cabe destacar como partes fundamentales de un rodamiento:

- Aro interno.
- Aro externo.
- Elementos rodantes (bolas o rodillos).
- Separador o jaula.

Para describir un rodamiento se definen una serie de parámetros que diferencian unos de otros según sus dimensiones, dentro de un mismo tipo. En la Figura 2.55. se pueden ver las medidas principales de dos tipos distintos de rodamientos, el primero radial de bolas y el segundo cónico. Los distintos tipos de rodamientos se expondrán más adelante.

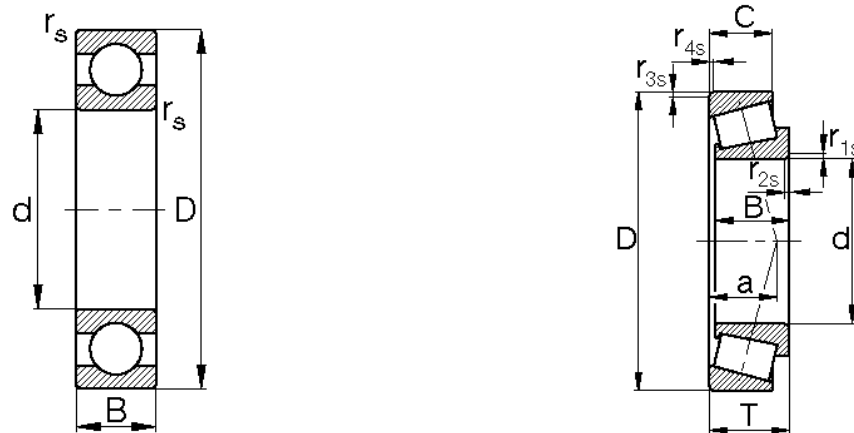


Figura 2.55. Dimensiones principales un rodamiento radial de bolas y de un rodamiento cónico.

3.4.1. Tipos de rodamientos

Los rodamientos pueden ser clasificados de muchas maneras: según dirección de la carga, según el elemento soporte, según la inclinación del eje o del árbol, según el elemento rodante... pero las más importantes son en función de la carga que principalmente transmiten y de los elementos rodantes que poseen.

3.4.1.1. Clasificación de los rodamientos según la carga que transmiten

Atendiendo a la carga que principalmente transmiten los rodamientos, estos se pueden clasificar como:

- **Rodamientos radiales:** tienen un ángulo de contacto nominal de $\alpha \leq 45^\circ$
- **Rodamientos axiales:** tienen un ángulo de contacto nominal de $\alpha > 45^\circ$

Donde el ángulo de contacto α es el comprendido entre las líneas de contacto de los cuerpos rodantes y el plano radial del rodamiento, como se muestra en la siguiente figura:

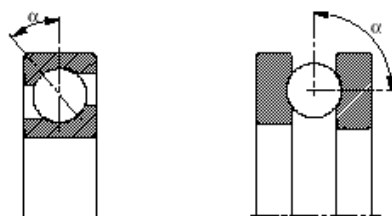


Figura 2.56. Representación gráfica del ángulo de contacto, α .

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Según el tipo de sollicitación que soporta el rodamiento, ya sea radial, axial o una combinación de ambas, se debe usar un rodamiento con un elemento rodante u otro, como se describe a continuación.

SOLICITACIÓN A CARGA RADIAL

Cuando se tiene una sollicitación a carga radial se debe tener en cuenta que los rodamientos de rodillos, generalmente, resisten mayores sollicitaciones que los rodamientos de bolas de igual tamaño.

Los rodamientos de rodillos cilíndricos tipo N y NU únicamente resisten sollicitaciones radiales, mientras que los rodamientos radiales de los demás tipos absorben cargas radiales y axiales.

En la Figura 2.57. se muestran los principales tipos de rodamientos utilizados cuando existe un predominio de cargas radiales, así como el nivel de carga radial o axial que pueden soportar.

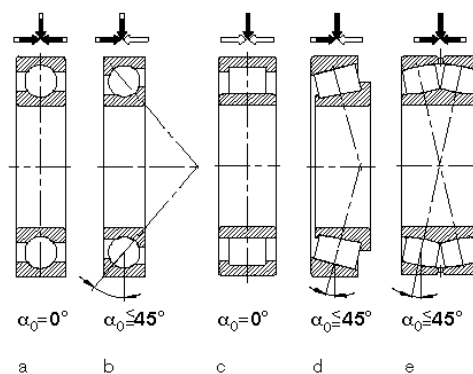


Figura 2.57. Principales tipos de rodamientos usados en casos de sollicitaciones predominantemente radiales.

SOLICITACIÓN A CARGA AXIAL

Según su ejecución, los rodamientos axiales de bolas de contacto angular son capaces de absorber fuerzas axiales en un sentido o en ambos sentidos. Aún así, cuando existen fuerzas axiales muy elevadas, se prefieren rodamientos axiales oscilantes de rodillos.

Los rodamientos axiales oscilantes de rodillos y los rodamientos axiales de bolas de contacto angular de simple efecto, absorben fuerzas axiales y cierta carga radial combinadas. Los demás tipos de rodamientos axiales solamente sirven para absorber fuerzas axiales.

En la Figura 2.58. se muestran los principales tipos de rodamientos utilizados cuando existe un predominio de cargas axiales, así como el nivel de carga radial o axial que pueden soportar.

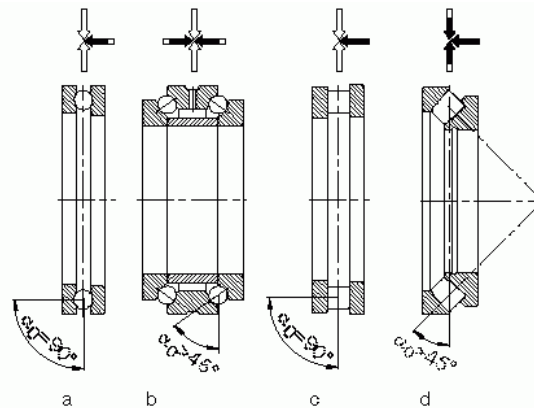


Figura 2.58. Principales tipos de rodamientos usados en casos de solicitaciones predominantemente axiales.

CAPACIDAD DE CARGA RADIAL Y AXIAL COMBINADA

Las superficies de rodadura inclinadas permiten a los rodamientos de rodillos cónicos soportar cargas radiales y axiales combinadas (Figura 2.59.). Cuanto mayor sea el ángulo entre la superficie de rodadura y el eje de rotación del rodamiento, mayor es la relación entre la capacidad axial y la radial del rodamiento.

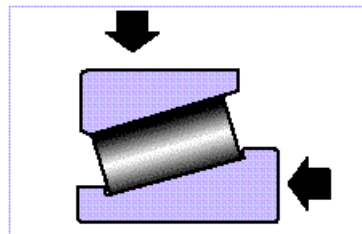


Figura 2.59. Combinación de carga radial y axial en un rodamiento cónico.

Una mayor longitud de la línea de contacto entre los rodillos y las superficies de rodadura proporciona al rodamiento de rodillos cónicos una alta capacidad de carga. Este factor unido a la capacidad para soportar cargas radiales, axiales o cualquier combinación entre estas, hace del rodamiento de rodillos cónicos el elegido en muchas aplicaciones.

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para un determinado diámetro de eje es posible seleccionar una sección de rodamiento ligera o pesada según lo que requieran las cargas o las necesidades de vida nominal del rodamiento para cada aplicación específica (Figura 2.60.).

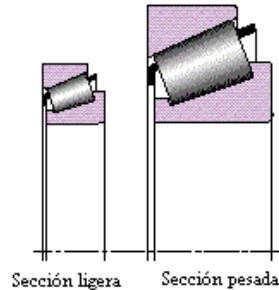


Figura 2.60. Tipo de sección de un rodamiento cónico en función de las cargas, para un diámetro

ALINEACIÓN TOTAL DE LOS RODAMIENTOS

La alineación total de los rodillos es una de las mayores ventajas de los rodamientos de rodillos cónicos. La configuración cónica del rodillo no sólo asegura un auténtico movimiento de rodadura, permitiendo a la vez que el rodamiento tenga una larga línea de carga de contacto rodillo-superficie de rodadura sino que, además, genera una fuerza de asentamiento que empuja al rodillo contra la mayor de las pestañas de la pista interior.

La fuerza de asentamiento es función de los diferentes ángulos de las pistas interior y exterior. Esta fuerza impide a los rodillos cruzarse en su rodadura abandonando la alineación, por consiguiente, los mantiene perfectamente alineados y colocados en contacto contra la pestaña de la pista interior (Figura 2.61.).

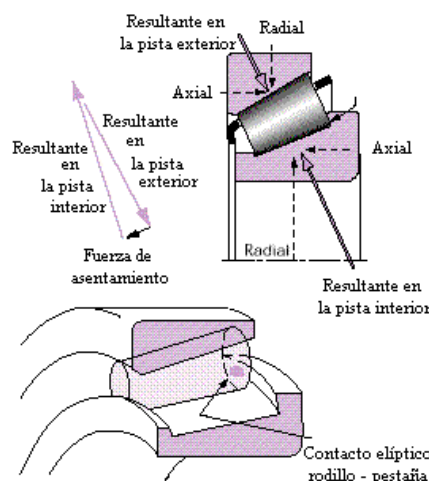


Figura 2.61. Diagrama de fuerzas existentes un rodamiento cónico.

3.4.1.2. Clasificación de los rodamientos según sus elementos rodantes

El otro tipo fundamental de clasificar los rodamientos es en función del tipo de elementos rodantes que poseen. Esta clasificación se puede realizar fundamentalmente de la siguiente manera:

- **Rodamientos de bolas.**
- **Rodamientos de rodillos.**
- *Rodamientos de rodillos cilíndricos.*
- *Rodamientos de aguja (cilíndricos con longitud/diámetro > 2.5).*
- *Rodamientos de rodillos cónicos (forma de tronco cónico).*
- *Rodamientos de rodillos esféricos (forma de tonel).*

En la siguiente gráfica (Figura 2.62.) se puede contemplar esta clasificación, en la cual aparecen separados los distintos componentes para una mejor comprensión y visualización.

Componentes y vocabulario

	ANILLO EXTERIOR	ANILLO INTERIOR	ELEMENTOS RODANTES	Embutida	JAULA Mecanizada	Moledada
RODAMIENTOS A BOLAS						
RODAMIENTOS DE RODILLOS CONICOS						
RODAMIENTOS DE RODILLOS CILINDRICOS						
RODAMIENTOS DE RODILLOS ESFERICOS A ROTULA						
RODAMIENTOS DE AGUJAS						

Figura 2.62. Componentes de los rodamientos en función de su clasificación por el tipo de elementos rodantes que poseen.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Entre los distintos tipos de rodamientos existentes se describirán aquellos que son más utilizados comúnmente, los cuales son:

- Rodamientos rígidos de bolas.
- Rodamientos de bolas de contacto angular.
 - De una sola hilera.
 - De doble hilera.
- Rodamientos con cuatro caminos de rodadura.
- Rodamientos oscilantes de bolas.
- Rodamientos de rodillos cilíndricos.
- Rodamientos de agujas.
- Rodamientos de rodillos cónicos.
 - De una sola hilera.
 - De dos y cuatro hileras.
- Rodamientos oscilantes de rodillos.
 - De una sola hilera.
 - De doble hilera.
- Rodamientos axiales de bolas.
 - Simple efecto.
 - Doble efecto.
- Rodamientos axiales de bolas de contacto angular.
 - Simple efecto.
 - Doble efecto.
- Rodamientos axiales de rodillos cilíndricos.
- Rodamientos axiales de rodillos cónicos.

▪ **RODAMIENTOS RÍGIDOS DE BOLAS**

Los rodamientos rígidos de una sola hilera de bolas constituyen el tipo más usado de rodamientos por su gran variedad de aplicaciones en la industria y debido a su precio económico.

Soportan cargas radiales y axiales, además, son apropiados para revoluciones elevadas y baja pérdida de fuerza. La adaptabilidad angular de los rodamientos rígidos de bolas es relativamente pequeña. Los rodamientos obturados están exentos de mantenimiento y posibilitan construcciones sencillas.

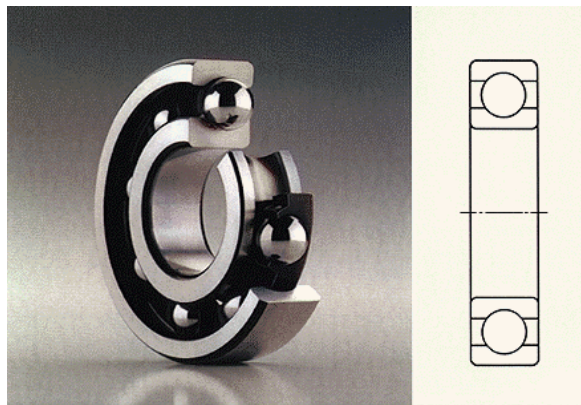


Figura 2.63. Rodamiento rígido de bolas de una sola hilera.

Aplicaciones típicas: motores eléctricos, cintas transportadoras, bombas, aplicaciones domésticas, en máquinas de oficina, máquinas herramientas y en aquellas máquinas donde quiera que haya elementos en rotación con baja fricción y poco ruido.

▪ **RODAMIENTOS DE BOLAS DE CONTACTO ANGULAR**

○ **DE UNA SOLA HILERA**

Los rodamientos de contacto angular de una sola hilera de bolas pueden absorber fuerzas axiales y radiales. Las fuerzas axiales son absorbidas solamente en una dirección. El ángulo de contacto más fabricado es el de 40°, el cual puede absorber elevadas cargas axiales. Los rodamientos con ángulo de contacto de 15°, 25° y 30° son para husillos altamente revolucionados y son una ejecución especial de los rodamientos de contacto angular de una hilera de bolas. Su campo de aplicación está en aquellos equipos que tienen que girar a altas velocidades y donde se exija máxima precisión de guiado.

Generalmente los rodamientos de bolas de contacto angular se usan por parejas. Este par se encarga del contra guiado y el juego entre ellos se tiene que ajustar de manera apropiada. El tipo de montaje se explicará más adelante en un apartado específico.

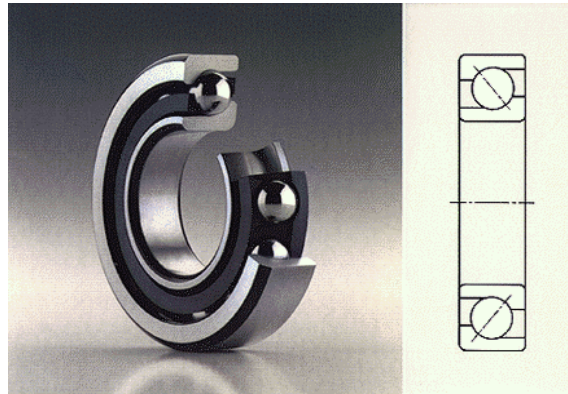


Figura 2.64. Rodamiento de bolas de contacto angular de una sola hilera.

○ DE DOBLE HILERA

El diseño de los rodamientos de bolas de contacto angular con dos hileras corresponde a una pareja de rodamientos de bolas de contacto angular de una sola hilera con disposición en "O", excepto que solamente tienen un anillo interior y exterior conteniendo dos superficies de rodadura de bolas. Los ángulos con los que vienen fabricados pueden ser 25° , 35° y 45° .

Este tipo de rodamiento puede absorber altas fuerzas radiales y axiales en ambos sentidos. Para absorber cargas axiales, especialmente elevadas en sentido alternativo, existen rodamientos de contacto angular con dos hileras de bolas con el aro interior partido.

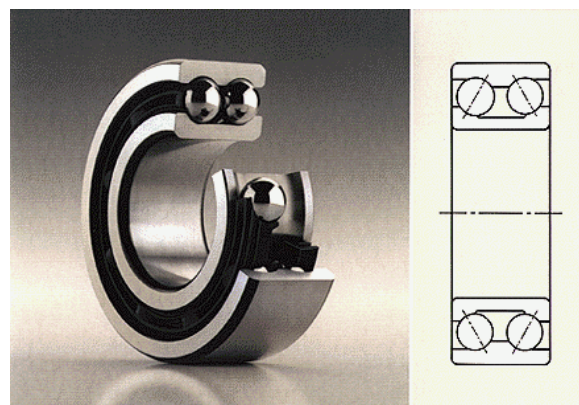


Figura 2.65. Rodamiento de bolas de contacto angular de doble hilera.

Aplicaciones típicas: Motores verticales, máquinas herramientas, mezcladoras, bombas, ruedas de automóviles, apoyos de tornillos sin fin, maquinaria de alta velocidad, etc.

▪ **RODAMIENTOS CON CUATRO CAMINOS DE RODADURA.**

Los rodamientos con cuatro caminos de rodadura son rodamientos de contacto angular de una hilera de bolas que absorben fuerzas axiales en ambos sentidos. El perfil de la sección de los caminos de rodadura, tanto del aro interior como del exterior, consta de arcos circulares que forman arcos en punta. El aro interior de los rodamientos con cuatro caminos de rodadura está partido, por ello es posible equipar este rodamiento con una gran cantidad de bolas.

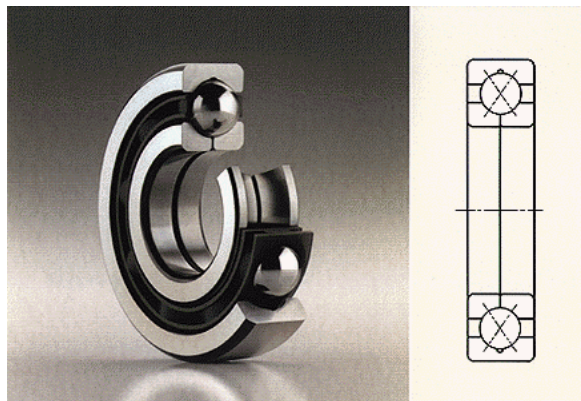


Figura 2.66. Rodamiento con cuatro caminos de rodadura.

Aplicaciones típicas: La principal aplicación de estos rodamientos está en el campo de transmisión de potencia donde existen cargas axiales.

▪ **RODAMIENTOS OSCILANTES DE BOLAS**

El rodamiento oscilante de bolas, llamado también autoalineable o rodamiento de bolas a rótula, es un rodamiento con dos hileras y con un camino de rodadura esférico (cóncavo en el aro exterior). Esta última característica le permite al rodamiento autoalinearse (de esta forma compensa errores de alineación del eje respecto al soporte). Existen rodamientos con agujero cilíndrico y con agujero cónico. Asimismo existen rodamientos con aro interior ancho. Estos rodamientos no son desmontables.

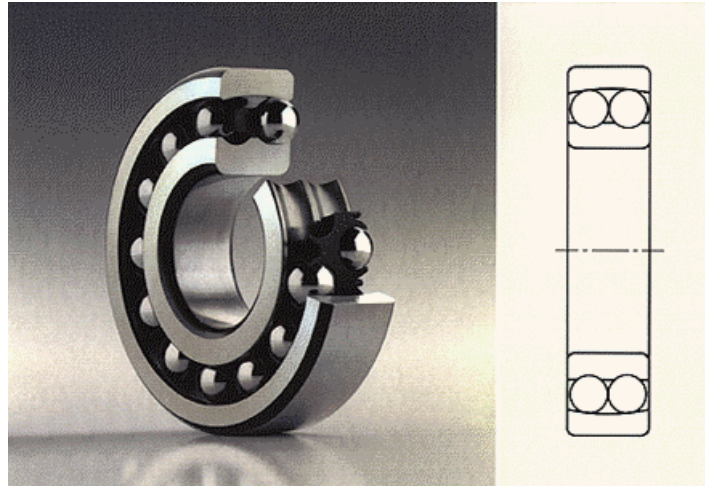


Figura 2.67. Rodamiento oscilante de bolas

Aplicaciones típicas: Para compensar errores de alineación del eje respecto al soporte.

▪ **RODAMIENTOS DE RODILLOS CILÍNDRICOS**

Los rodamientos de rodillos cilíndricos son desmontables, lo que facilita el montaje y desmontaje del rodamiento. Tienen una gran capacidad de carga radial y, a causa de su construcción, es apropiado para ser usado a altas velocidades. Los anillos interior y exterior están disponibles en muchas variedades.

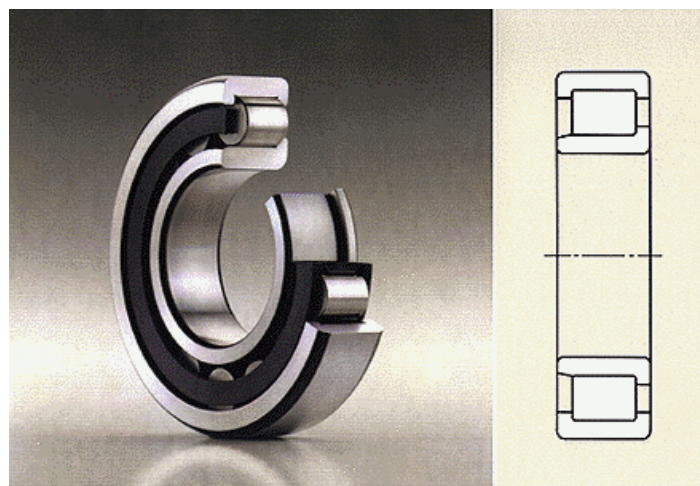


Figura 2.68. Rodamiento de rodillos cilíndricos de una sola hilera.

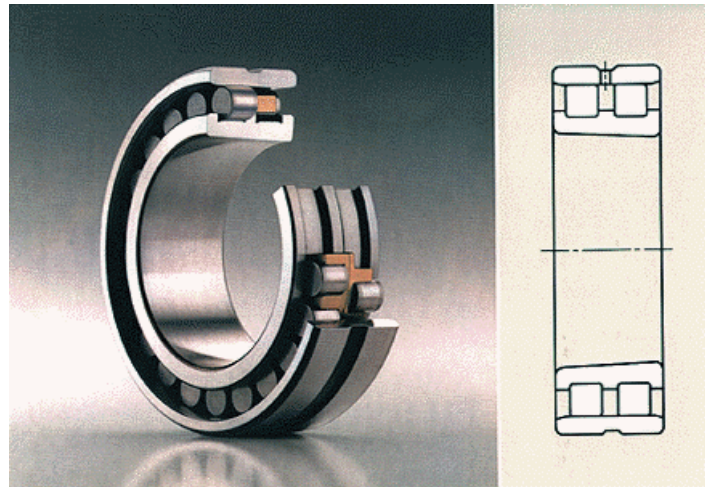


Figura 2.69. Rodamiento de rodillos cilíndricos de dos

Aplicaciones típicas: Motores vibrantes, cajas reductoras, turbinas de gas, motores eléctricos de media y alta potencia, locomotoras eléctricas, prensas, poleas, husillos de máquinas herramientas y otros.

▪ **RODAMIENTOS DE AGUJAS**

Los rodamientos de agujas son un tipo particular de los rodamientos de rodillos cilíndricos, cuyos rodillos se caracterizan por ser de diámetro pequeño comparado con su longitud ($\text{longitud}/\text{diámetro} > 2.5$).

Este rodamiento tiene como principal característica poder soportar una elevada carga radial en una sección reducida.

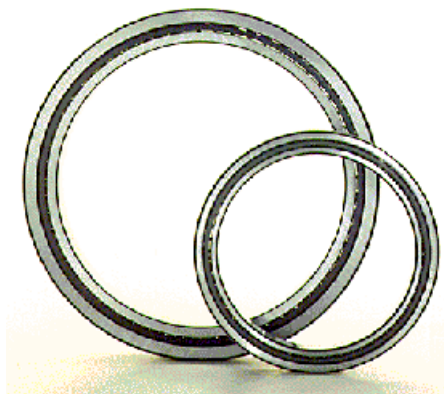


Figura 2.70 Rodamientos de agujas.

Aplicaciones típicas: Mecanismos de sincronismo de cajas de cambio automáticas, engranajes planetarios de las reducciones epicicoidales de las ruedas de los vehículos industriales y otros.

- **RODAMIENTO DE RODILLOS CÓNICOS**

- **DE UNA SOLA HILERA**

Los rodamientos de rodillos cónicos son desmontables.

Las superficies de rodadura inclinadas permiten a los rodamientos soportar altas cargas radiales y axiales. Cuanto mayor sea el ángulo entre la superficie de rodadura y el eje de rotación del rodamiento, mayor es la relación entre la capacidad axial y radial del rodamiento. Debido a que los rodamientos de rodillos cónicos de una hilera sólo absorben cargas axiales en un sentido, generalmente es necesario montar simétricamente un segundo rodamiento de rodillo cónico para el guiado en sentido opuesto. No pueden ser aplicados como rodamientos libres.

- **DE DOS Y CUATRO HILERAS**

Cuando las capacidades de carga de los rodamientos de una sola hilera no son suficientes se usan rodamientos de dos o cuatro hileras. Estos tipos de rodamientos soportan altas cargas radiales y axiales en ambos sentidos. Además, pueden ser montados como rodamientos libres.

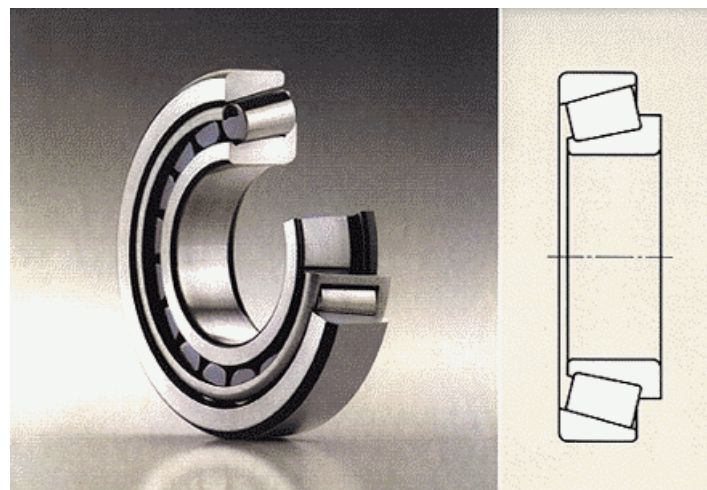


Figura 2.71. Rodamiento de rodillos cónicos de una sola hilera.

Aplicaciones típicas: Ventiladores mineros, máquinas herramientas, cajas reductoras, vagones de trenes, embarcaciones marítimas, aeronáuticas (tren de aterrizaje), cajas de cambios manual, ruedas de transmisiones de automóviles y camiones, máquinas de obras públicas, transmisiones y bujes de las ruedas de trenes, electrodomésticos y maquinaria industrial, en general.

- **RODAMIENTOS OSCILANTES DE RODILLOS**

- **DE UNA SOLA HILERA**

El rodamiento oscilante con una hilera de rodillos, es un rodamiento autoorientable. Se aplica adecuadamente en construcciones en la que se exige gran capacidad de carga radial y la compensación de errores angulares, asimismo está probada su utilidad en aplicaciones donde las fuerzas radiales son en forma de golpes.

Este rodamiento no es desmontable y se fabrica con agujero cilíndrico o cónico.

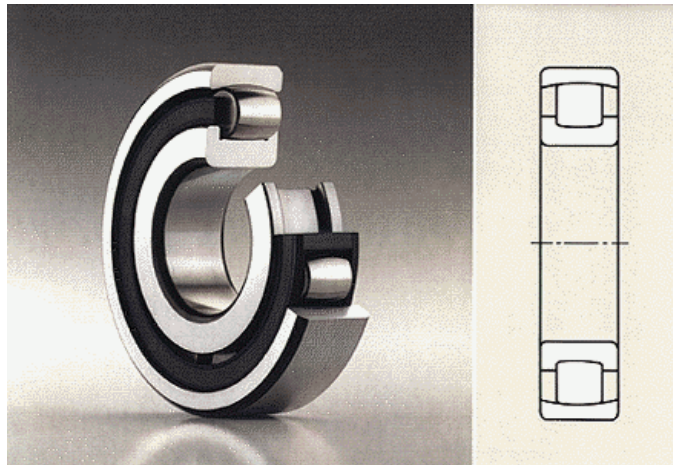


Figura 2.72. Rodamiento oscilante de rodillos de una sola hilera o rodamiento de rodillos esféricos.

- **DE DOBLE HILERA**

Este tipo de rodamiento oscilante de rodillos es un rodamiento que absorbe cargas muy grandes, ya que compensa los errores de alineación entre apoyos y las posibles flexiones del eje. Contienen dos hileras de rodillos esféricos que se adaptan angularmente, sin esfuerzos, en el camino de rodadura cóncavo-esférico del aro exterior.

Estos rodamientos se fabrican con agujeros cilíndricos o cónicos y pueden tener manguito de montaje o desmontaje.

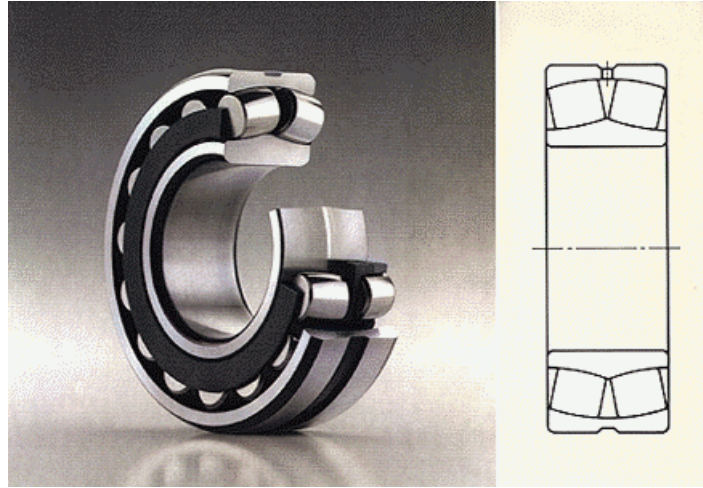


Figura 2.73. Rodamiento oscilante de rodillos (o de rodillos esféricos) de doble hilera.

Aplicaciones típicas: Motores de tracción, maquinaria de fabricación de papel, embarcaciones marítimas, vagones de trenes, rodillos laminadores, molinos, zarandas vibratorias, chancadoras, ventiladores y extractores industriales.

▪ **RODAMIENTOS AXIALES DE BOLAS**

Hay rodamientos axiales de bolas de dos tipos:

○ **SIMPLE EFECTO**

Solo admiten cargas axiales en un sentido, permitiendo grandes cargas axiales y grandes velocidades. Tienen una hilera de bolas.

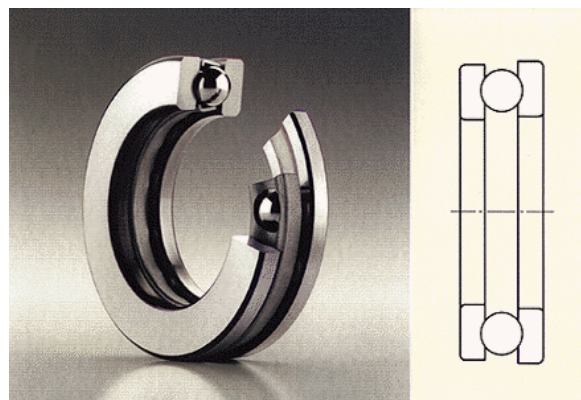


Figura 2.74. Rodamiento axial de bolas de simple efecto.

- **DOBLE EFECTO**

Diseñados para soportar empujes axiales en ambos sentidos y, como en el caso anterior, pueden soportar grandes empujes a considerable velocidad de giro. Tienen doble hilera de bolas.

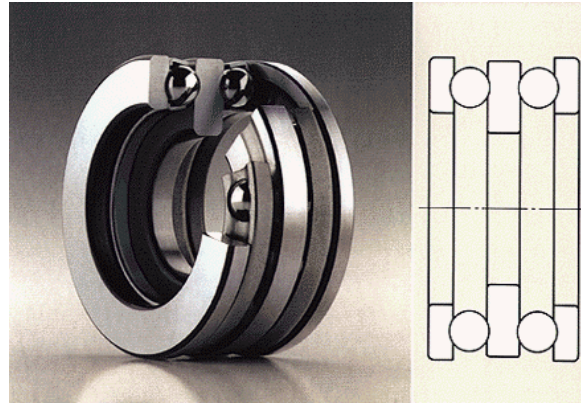


Figura 2.75. Rodamiento axial de bolas de doble efecto.

Aplicaciones típicas: Máquinas herramientas, cajas reductoras, carteles publicitarios giratorios con ejes verticales y otros.

- **RODAMIENTOS AXIALES DE BOLAS DE CONTACTO ANGULAR**

Los rodamientos axiales de bolas de contacto angular se fabrican siguiendo dos tipos de configuración, ambos con un ángulo de 60°.

- **SIMPLE EFECTO**

Son rodamientos de precisión con tolerancias restringidas. No son desmontables, funcionan con poco rozamiento y elevada precisión de posicionamiento. Tienen una hilera de bolas.

- **DOBLE EFECTO**

También son rodamientos de precisión con tolerancias restringidas, pero en este caso, el rodamiento está montado inmediatamente al lado del asiento cónico del eje de un rodamiento con dos hileras de rodillos cilíndricos. Tienen doble hilera de bolas.

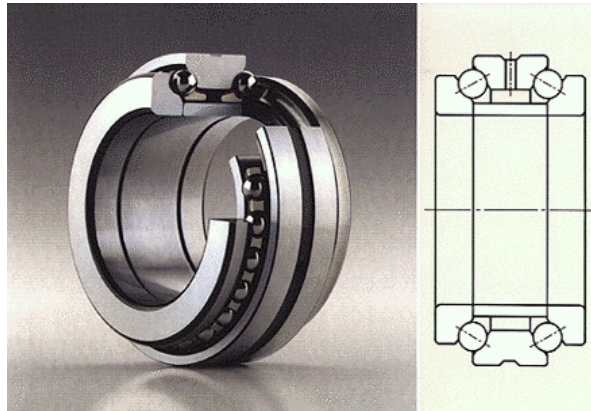


Figura 2.76. Rodamiento axial de bolas de contacto angular de doble efecto.

Aplicaciones típicas: Máquinas herramientas.

▪ **RODAMIENTOS AXIALES DE RODILLOS CILÍNDRICOS**

Los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos tienen una gran capacidad de carga, son insensibles a los golpes y absorben fuerzas axiales elevadas en un solo sentido. Son desmontables.

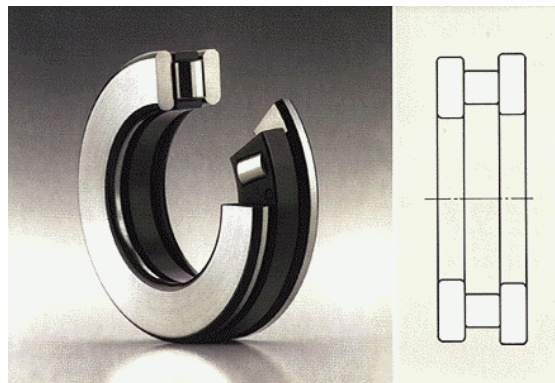


Figura 2.77. Rodamiento axial de rodillos cilíndricos.

Aplicaciones típicas: Maquinas herramientas.

▪ **RODAMIENTOS AXIALES DE RODILLOS CÓNICOS**

Los rodamientos axiales de rodillos cónicos se fabrican de dos tipos: para aplicaciones oscilantes y para aplicaciones con cargas muy altas. Debe tenerse en cuenta que las cargas radiales no deben ser mayores del 55% de la carga axial. Además son apropiados para elevadas revoluciones.

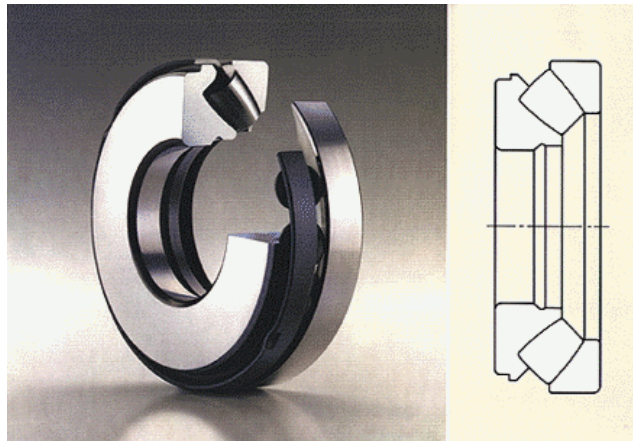


Figura 2.78. Rodamiento axial de rodillos cónicos.

Aplicaciones típicas: Automoción y mesas giratorias en máquinas herramientas.

COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS

Como ya se ha visto, cada tipo de rodamiento tiene unas características propias y, en consecuencia, unas aplicaciones u otras. Si se comparan entre sí, de una forma más visual, es posible obtener resultados como las gráficas de las Figuras 2.79. y 2.80., en las que se comparan distintos tipos básicos de rodamientos en función de su vida a fatiga. En la Figura 2.79. se muestra la vida relativa de cada tipo y en la Figura 2.80. el precio de cada rodamiento para una vida a fatiga determinada.

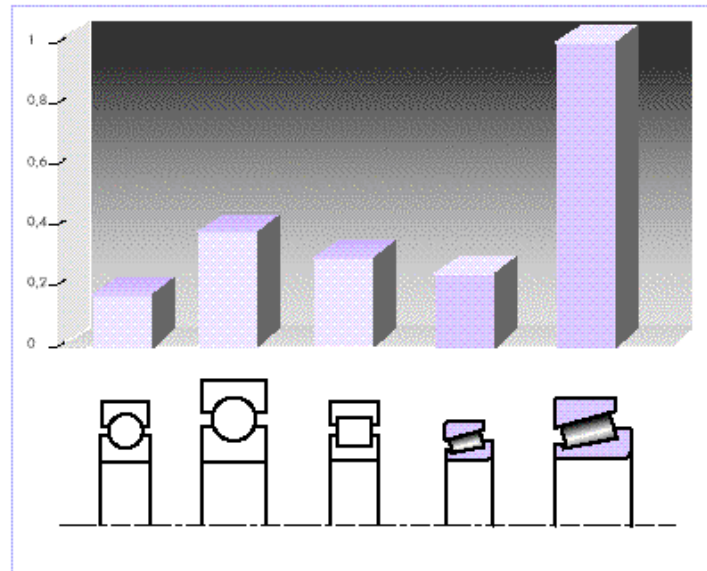


Figura 2.79. Comparación de vida a fatiga de distintos tipos de rodamientos para la misma combinación de carga radial-axial.

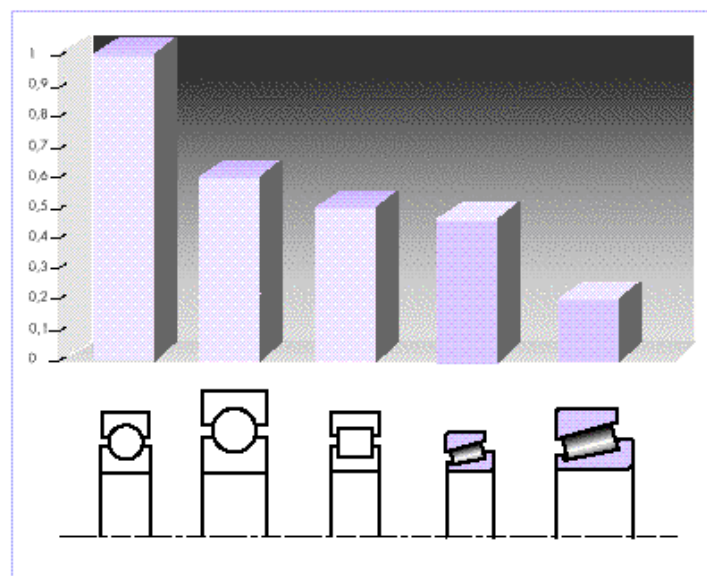


Figura 2.80. Comparación del precio de distintos tipos de rodamientos para una vida a fatiga determinada.

3.4.2. Tipos de daños en rodamientos

Cada avería primitiva del rodamiento genera su propio deterioro característico. Este, conocido como daño primario, da lugar a daños secundarios que inducen al daño más grave: desconchado y rotura. Frecuentemente, un rodamiento averiado ostenta una combinación de daño inicial y daño secundario.

Los diferentes tipos de daños que se producen en los rodamientos se pueden clasificar de la siguiente manera:

Tabla 2.8. Diferentes tipos de daños que se producen en los rodamientos.

Daño inicial o primario	Daño secundario
Desgaste Muescas Adherencia Fatiga superficial Corrosión Daño por corriente eléctrica	Desconchado (descascarillado) Roturas

3.4.2.1. Desgaste

En condiciones normales, no existe desgaste apreciable en los rodamientos, sin embargo, este puede producirse como resultado de la presencia de partículas extrañas dentro del rodamiento, cuando la lubricación es insatisfactoria o debido a vibraciones en rodamientos que permanecen estacionarios.

a) Desgaste producido por partículas abrasivas

Las pequeñas partículas abrasivas causan desgaste en los caminos de rodadura, los elementos rodantes y la jaula. La cantidad de partículas abrasivas se incrementa, gradualmente, a medida que el material se va desprendiendo de los caminos de rodadura y de la jaula. Por lo que el desgaste se convierte en un proceso acelerado, hasta el punto de hacer inservible el rodamiento. Sin embargo, no es necesario tirar a la chatarra rodamientos ligeramente desgastados ya que pueden ser utilizados de nuevo después de una buena limpieza.

Tabla 2.9. Desgaste producido por partículas abrasivas.

Aspecto	Causa	Medidas
Pequeñas muescas en el contorno de los caminos de rodadura y elementos rodantes. Superficies opacas y desgastadas. Grasa verde descolorada.	Ausencia de limpieza antes y durante la operación de montaje. Obturaciones ineficaces. Lubricante contaminado debido a partículas de la jaula de latón.	No desembalar los rodamientos hasta justo antes de ser montados. Mantener limpio el taller y usar herramientas limpias. Verificar y posiblemente mejorar la estanqueidad. Utilizar siempre lubricante nuevo y limpio. Limpiar los engrasadores. Filtrar el aceite.

b) Desgaste producido por lubricación inadecuada

Si no hay suficiente lubricante o si éste ha perdido sus propiedades lubricantes se produce un contacto metálico entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura. Los picos de rugosidad, remanentes del proceso de fabricación, se desprenden y, al mismo tiempo, se obtiene un cierto efecto de laminado. La fatiga superficial también puede surgir en esta etapa. Si el lubricante está completamente agotado la temperatura se elevará rápidamente, entonces el material templado se reviene y la superficie adquiere matices entre azul y pardo. La temperatura puede llegar a ser tan alta como para producir el gripado del rodamiento.

Tabla 2.10. Desgaste producido por lubricación inadecuada.

Aspecto	Causa	Medidas
Desgaste habitualmente especular de superficies. En una etapa posterior pasa del color azul hasta el pardo.	El lubricante se ha agotado gradualmente o ha perdido sus propiedades lubricantes.	Comprobar que el lubricante llega al rodamiento. Relubricación más frecuente.

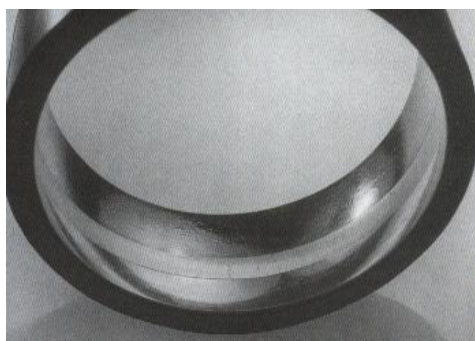


Figura 2.81. Aro exterior de un rodamiento de rodillos a rótula que no ha sido adecuadamente lubricado. Los caminos poseen un brillo especular.

c) Desgaste producido por vibración

Cuando un rodamiento no gira no se forma la película de lubricante entre los elementos rodantes y los caminos de rodadura. La ausencia de esta película permite el contacto metálico y la vibración produce pequeños movimientos relativos entre los elementos rodantes y los aros. Como resultado de este movimiento, se rompen pequeñas partículas de la superficie y esto lleva a la formación de depresiones en los caminos de rodadura. Este deterioro es conocido como vibrocorrosión (falsa huella Brinell). Las bolas producen cavidades esféricas mientras que los rodillos producen acanaladuras.



Figura 2.82. Aro interior y exterior de un rodamiento de rodillos cilíndricos expuesto a vibraciones. El aro interior ha cambiado de posición.

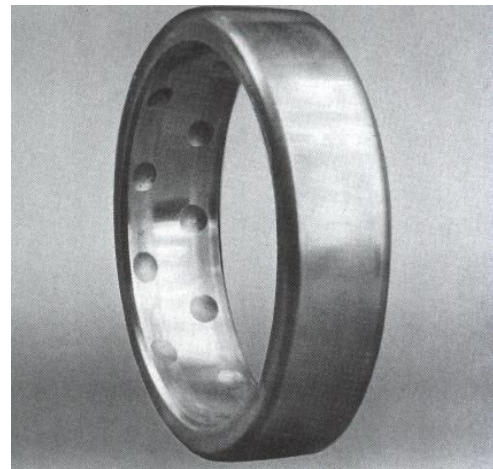


Figura 2.83. Aro exterior de un rodamiento de bolas a rótula, deteriorado por vibraciones. El rodamiento no ha girado en absoluto.

En muchos casos es posible percibir herrumbre roja en el fondo de las depresiones que está originada por la oxidación (como resultado de su exposición al aire) de partículas desprendidas que presentan una gran área en relación con su volumen. Nunca existe deterioro visible en los elementos rodantes.

Cuanto mayor es la energía de vibración, más severo es el daño. El período de tiempo y la magnitud del juego interno del rodamiento también se hacen notar, sin embargo, la frecuencia de las vibraciones no parece tener ningún efecto considerable.

Los rodamientos de rodillos han demostrado ser más sensibles a este tipo de deterioros que los rodamientos de bolas. Esto se debe a que las bolas pueden rodar en cualquier dirección mientras que los rodillos sólo ruedan en una dirección, y el movimiento en otras direcciones se efectúa forma de deslizamiento.

Los rodamientos con deterioro por vibración se encuentran generalmente en máquinas que no están funcionando pero cercanas a otras máquinas que producen vibraciones.

Tabla 2.11. Desgaste producido por vibración.

Aspecto	Causa	Medidas
Depresiones en los caminos de rodadura. Estas depresiones son alargadas en los rodamientos de rodillos y circulares en los rodamientos de bolas. Existe brillo o herrumbre en el fondo.	El rodamiento ha estado expuesto a vibraciones mientras no giraba.	Asegurar el rodamiento durante el transporte mediante precarga radial. Proveer una base anti-vibratoria. Utilizar, si es posible, rodamientos de bolas en lugar de los de rodillos. Emplear lubricación por baño de aceite, si es posible.

3.4.2.2. Muescas

Los caminos de rodadura y los elementos rodantes del rodamiento pueden llegar a presentar muescas si la presión de montaje está aplicada al aro equivocado, de forma que esta se transmite a través de los elementos rodantes, ora porque el rodamiento está sujeto a cargas anormales mientras no está girando, ora debido a partículas extrañas en el rodamiento.

a) Muescas producidas por defecto de montaje o sobrecarga

La distancia entre las huellas es idéntica al espacio existente entre los elementos rodantes. Los rodamientos de bolas son propensos a muescas si la presión es aplicada de tal modo que se transmita a través de las bolas durante las operaciones de montaje o desmontaje. Los rodamientos de bolas a rótula son particularmente susceptibles a deterioro en tales circunstancias. En rodamientos de rodillos a rótula el deterioro sobreviene como “adherencia” (“smearing”) y, posteriormente, si se incrementa la presión, llega a convertirse en una huella. Las mismas condiciones son aplicables a rodamientos de rodillos cónicos que, sin girar, se precargan demasiado.

Los rodamientos que se montan con excesiva interferencia y los rodamientos con agujero cónico que se calan demasiado en el asiento del eje o manguito, también llegan a mellarse.

Tabla 2.12. Muescas producidas por defecto de montaje o sobrecarga.

Aspecto	Causa	Medidas
Muescas en los caminos de rodadura de ambos aros en espacios iguales a la distancia entre los elementos rodantes.	Presión de montaje aplicada al aro equivocado. Montaje excesivamente fuerte sobre asiento cónico. Sobrecarga en reposo.	Aplicar la presión de montaje al aro con ajuste de interferencia. Seguir detenidamente las instrucciones relativas al montaje de rodamientos sobre asiento cónico. Evitar sobrecargas o usar rodamientos con una mayor capacidad de carga estática.

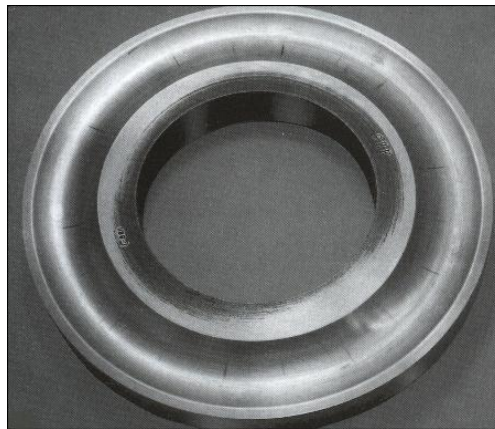


Figura 2.84. Arandela de un rodamiento axial de bolas sujeta a sobrecarga mientras no gira. Las muescas, estrechas y radialmente alineadas, no son esféricas como en los rodamientos radiales de bolas.

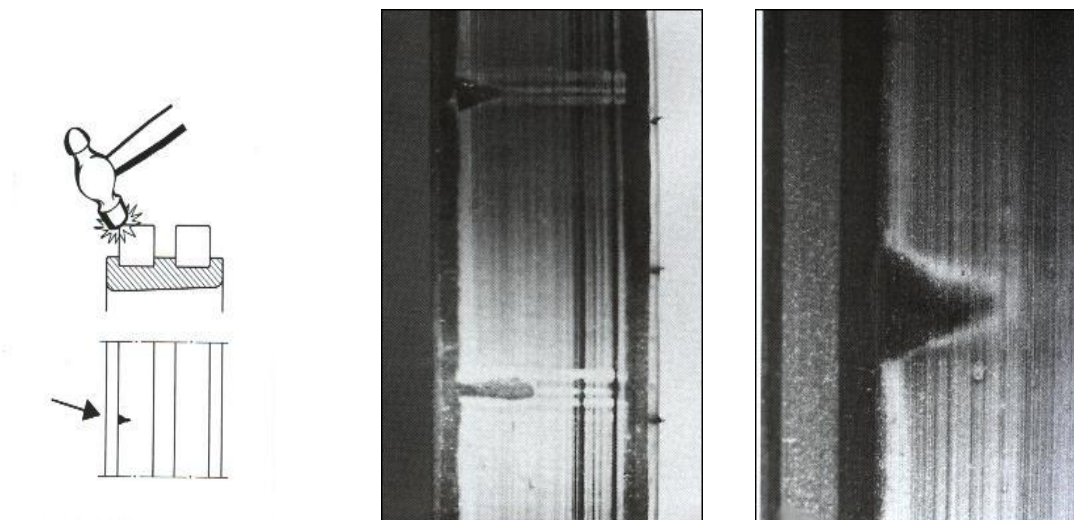


Figura 2.85. a), b) y c). Ejemplo de los resultados de una manipulación indebida. En un rodamiento de dos hileras de rodillos cilíndricos, un rodillo ha sufrido un impacto (Figura 2.85. a). Una vista periférica del rodillo (Figura 2.85. b) muestra dos muescas diametralmente opuestas. El rodillo, a su vez, ha marcado el camino de rodadura del aro interior (Figura 2.85. c).

b) Muecas producidas por partículas extrañas

Las partículas extrañas causan muescas cuando son arrolladas en los caminos de rodadura por los elementos rodantes. Las partículas que producen las muescas ni siquiera necesitan ser duras. Fragmentos delgados de papel e hilos desprendidos de algodón o de trapos usados para limpieza, pueden provocar esta avería. Las muescas causadas por estas partículas son en la mayoría de los casos, pequeñas y distribuidas por los caminos de rodadura.

Tabla 2.13. Muestras producidas por partículas extrañas.

Aspecto	Causa	Medidas
Pequeñas muescas distribuidas en los caminos de rodadura de ambos aros y en los elementos rodantes.	Penetración de partículas extrañas en el rodamiento.	Observar limpieza durante el montaje. Lubricante no contaminado. Mejorar las obturaciones.



Figura 2.86. Muecas provocadas por suciedad, en uno de los caminos de rodadura de un rodamiento de rodillos.

3.4.2.3. Adherencias

Cuando dos superficies lubricadas deslizan entre sí, bajo carga, el material se transfiere de una a otra, esto se conoce como adherencia, y las superficies correspondientes llegan a desgarrarse y presentar mal aspecto. Cuando se produce adherencia, el material alcanza generalmente tales temperaturas que da lugar a revenido. Esto produce concentraciones de fatiga localizadas que pueden originar agrietamiento o desconchado.

En los rodamientos de rodillos el deslizamiento se produce principalmente entre superficies en el extremo de rodillo-pestaña de guía. La adherencia también puede surgir cuando los rodillos están sometidos a severa aceleración al entrar en la zona de carga. Si los aros giran respecto a su asiento en el eje o soportes, también se puede provocar adherencias en el agujero, diámetro exterior o caras laterales de dichos aros.

En los rodamientos axiales de bolas, la adherencia puede ocurrir si la carga es demasiado ligera con relación a la velocidad de rotación.

a) Adherencia de extremos de rodillos y pestañas de guía

En rodamientos de rodillos cilíndricos y cónicos, y en rodamientos de rodillos a rótula con pestañas de guía, se puede producir adherencias sobre las caras de guía de las pestañas y los extremos de los rodillos. Esto se atribuye a lubricación insuficiente entre pestañas y rodillos. Ocurre cuando una carga axial fuerte actúa en un sentido durante mucho tiempo, por ejemplo cuando los rodamientos de rodillos cónicos están sometidos a excesiva precarga. En los casos en que la carga axial cambia de sentido, la adherencia es menos común, ya que cuando el extremo del rodillo queda descargado hay mayor oportunidad para que el lubricante entre. Mediante un lubricante adecuado se pueden evitar en gran medida tales adherencias.

Tabla 2.14. Adherencia de extremos de rodillos y pestañas de guía.

Aspecto	Causa	Medidas
Extremo de rodillos y cara de pestañas deteriorados y descoloridos.	Deslizamiento bajo cargas axiales pesadas y con lubricación inadecuada.	Lubricante más apropiado.



Figura 2.87. Adherencia sobre la superficie de un rodillo de un rodamiento de rodillos a rótula.

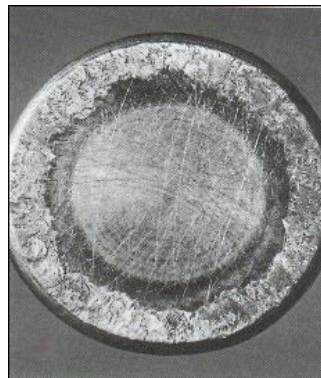


Figura 2.88. Rodillo cilíndrico con adherencias en el extremo, causadas por fuerte carga axial y lubricación inadecuada.

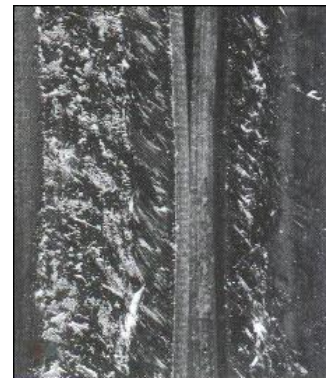


Figura 2.89. Pestaña de guía con adherencias, causadas por fuerte carga axial y lubricación inadecuada.

b) Adherencia por patinado de rodillos y caminos de rodadura

En ciertas circunstancias se pueden presentar adherencias sobre superficies de rodillos y en caminos de rodadura de rodamientos de rodillos cilíndricos y a rótula. Esto se produce al estar retardada la rotación de los rodillos en la zona sin carga, cuando éstos no son conducidos por los aros.

Consecuentemente su velocidad de rotación es entonces menor que cuando están en la zona con carga. Los rodillos están sometidos a una rápida aceleración y el deslizamiento resultante es tan grande que puede producir adherencia.

Tabla 2.15. Adherencia por patinado de rodillos y caminos de rodadura.

Aspecto	Causa	Medidas
Zonas deterioradas y descoloridas en la zona de carga de los caminos de rodadura y sobre la superficie de rodillos.	Aceleración del rodillo al entrar en zona de carga.	Lubricante más apropiado. Reducir el juego interno del rodamiento.

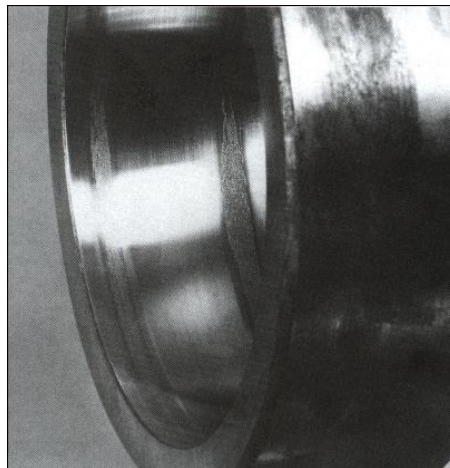


Figura 2.90. Adherencia sobre la superficie de un rodillo de un rodamiento de rodillos a rótula.

c) Adherencia de caminos a intervalos correspondientes al espacio entre rodillos

Con demasiada frecuencia, cuando los rodamientos de rodillos cilíndricos están siendo montados, el conjunto del aro con rodillos y jaula se introduce inclinados, sin ser girados. Entonces los rodillos marcan el camino de rodadura del otro aro, en forma de trazos largos y transversales. Los rodillos también pueden estar marcados. Este tipo de fallo puede ser evitado si el rodamiento está bien lubricado y uno de los aros se gira. Cuando se monta un número de rodamientos elevado es oportuno utilizar un anillo guía de montaje. Puede surgir un daño parecido si los aros del rodamiento se montan con ajuste demasiado fuerte en relación con el juego interno, tal como ocurre con la precarga.

Trazos de adherencia también pueden aparecer entre los caminos de rodadura de rodamientos de rodillos a rótula o cónicos. Estos trazos son el resultado de una mala manipulación o de prácticas incorrectas de montaje. Los impactos o fuertes presiones aplicadas al aro equivocado, sin girar el rodamiento, hacen que los rodillos produzcan marcas transversales estrechas de adherencia en los caminos de rodadura.

Tabla 2.15. Adherencia de caminos a intervalos correspondientes al espacio entre rodillos.

Aspecto	Causa	Medidas
Trazos transversales (a intervalos iguales a la distancia entre rodillos) en caminos de rodadura, en rodamientos de rodillos cilíndricos.	Durante la operación de montaje el conjunto del aro con rodillos y jaula ha entrado inclinado sobre el otro aro.	Girar el aro exterior o interior al montado. Lubricar bien las superficies. Usar un anillo guía cuando se monten una serie de rodamientos.
Trazos transversales (a intervalos iguales a la distancia entre rodillos) en caminos de rodadura, en rodamientos de rodillos cónicos y a rótula.	Golpes aplicados al aro equivocado o pesadas precargas aplicadas sin girar el rodamiento.	Girar el rodamiento mientras está siendo ajustado. Aplicar la fuerza contra el aro más ajustado. Nunca permitir que la fuerza se transmita a través de los elementos rodantes.

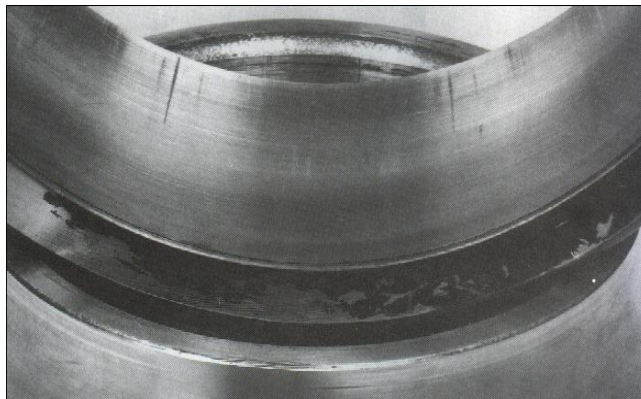


Figura 2.91. a) Camino de rodadura del aro exterior de un rodamiento de rodillos a rótula con trazos de adherencia producidos por un golpe contra el aro interior.

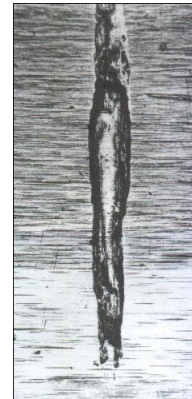


Figura 2.91. b) Detalle de uno de los trazos de adherencia.

d) Adherencia de superficies externas

La adherencia puede aparecer sobre las superficies externas de rodamientos fuertemente cargados. La adherencia, en este caso, es el resultado de movimientos relativos entre el aro del rodamiento y su eje o soporte. La adherencia del agujero del aro interior, superficie externa del aro exterior y de las caras laterales sólo se puede evitar si los ajustes son tan estrechos como para impedir el movimiento del aro respecto a su asiento correspondiente. Una compresión axial más fuerte no sirve.

Tabla 2.16. Adherencia de superficies externas.

Aspecto	Causa	Medidas
Caras o superficies del aro interior o exterior deterioradas y descoloridas.	Giro relativo del aro respecto a su eje o soporte.	Elegir otros ajustes con mayor interferencia.

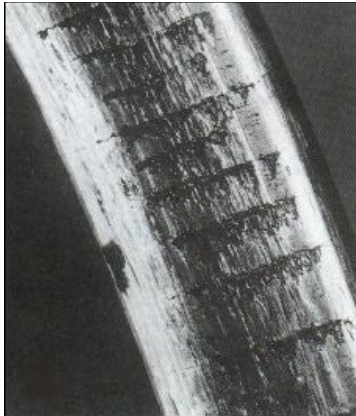


Figura 2.92. Cara con adherencias del aro interior de un rodamiento de rodillos cilíndricos.



Figura 2.93. Superficie exterior con adherencias del aro exterior de un rodamiento de rodillos a rótula. La transferencia de material se ha producido desde el alojamiento al aro del rodamiento.

e) Adherencia de superficies internas

Ocurre la adherencia en los caminos de rodadura de un rodamiento axial de bolas si la velocidad de rotación es demasiado alta en relación con la carga. Entonces, la fuerza centrífuga impulsa las bolas hacia la parte externa de los caminos de rodadura poco profundos. Allí las bolas no ruedan satisfactoriamente por las pistas y se produce gran deslizamiento en los contactos. Esto conduce a la formación de marca diagonales en la parte externa de los caminos de rodadura. En el caso de rodamientos axiales de bolas, trabajando bajo carga ligeras y altas velocidades, tal deterioro puede evitarse sometiendo el rodamiento a una carga adicional, por ejemplo, aplicando muelles.

Tabla 2.17. Adherencia de superficies internas.

Aspecto	Causa	Medidas
Marcas diagonales en caminos de rodadura.	Carga demasiado ligera en relación con la velocidad de rotación.	Precargar el rodamiento mediante muelles.

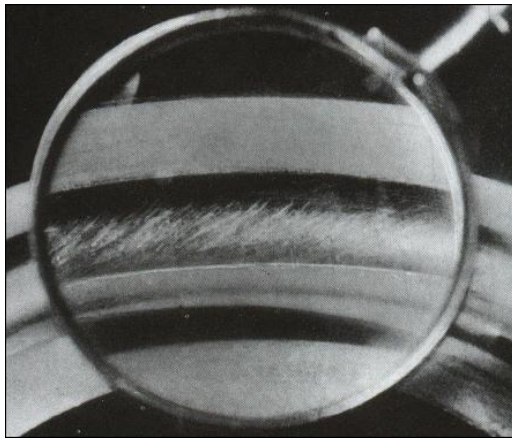


Figura 2.94. Camino de rodadura de rodamiento axial de bola con marcas debidas a una velocidad de giro demasiado elevada en relación con la carga.

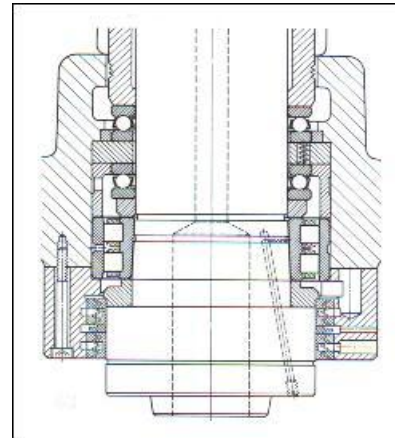


Figura 2.95. Precarga de rodamientos axiales de bolas por medio de muelles.

3.4.2.4. Fatiga superficial

Si la película de lubricante entre los caminos de rodadura y los elementos rodantes llega a ser demasiado fina, las crestas de asperezas superficiales entrarán momentáneamente en contacto entre sí. Entonces, se producirán pequeñas grietas en la superficie, lo cual se conoce como fatiga superficial. Estas grietas no deben confundirse con las grietas de fatiga, que se originan debajo de la superficie y conducen al descascarillado. Las grietas de fatiga superficial son microscópicamente pequeñas y crecen, gradualmente, hasta un tamaño tal que interfiere en el suave rodaje del rodamiento. Estas grietas pueden, sin embargo, acelerar la formación de grietas de fatiga bajo la superficie y acortar así la vida del rodamiento.

Si la lubricación se mantiene siempre satisfactoria, es decir, si la película no llega a ser muy delgada debido a lubricante insuficientes, a cambios de viscosidad producidos por elevada temperatura, o a excesiva carga, no hay riesgo de fatiga superficial.

Tabla 2.18. Fatiga superficial.

Aspecto	Causa	Medidas
Inicialmente el deterioro no se percibe a simple vista. En fase más avanzada, se hacen evidentes cráteres pequeños y poco profundos con fractura cristalinas superficiales.	Insuficiente o inadecuada lubricación.	Mejorar la lubricación.



Figura 2.96. a) Fatiga superficial en forma de una banda rodeando el rodillo de un rodamiento de rodillos a rótula.

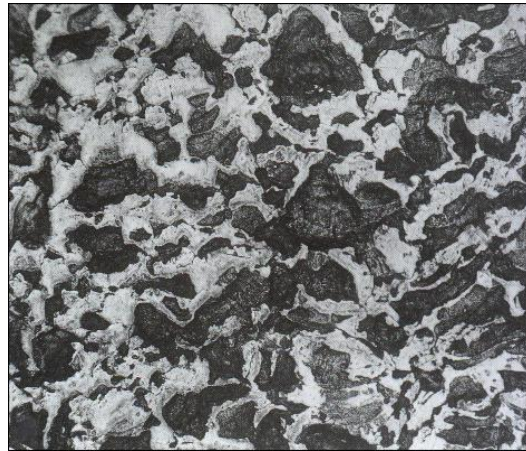


Figura 2.96. b) Detalle de la zona de fatiga superficial.

3.4.2.5. Corrosión

Si se introducen agua o agentes corrosivos en el rodamiento, en tal cantidad que el lubricante no puede ofrecer protección para la superficie del acero, se formará óxido. Este proceso conducirá pronto a zonas de óxido profundo. Otro tipo de corrosión que también se produce en los rodamientos es la oxidación de contacto.



Figura 2.97. Oxidación en el aro interior de un rodamiento cónico. La oxidación tiene un espaciado equivalente a la distancia entre elementos rodantes. La oxidación se ha producido por la presencia de agua en el lubricante.



Figura 2.98. Corrosión en el anillo interior de un rodamiento de rodillos esféricos a rótula. Producida por la entrada de agua en el rodamiento.



Figura 2.99. Oxidación en el aro exterior de un rodamiento cónico. La oxidación tiene un espaciado equivalente a la distancia entre elementos rodantes. La oxidación se ha producido por la presencia de agua en el lubricante. Algunos puntos se han corroído.

a) Oxido profundo

Una delgada película protectora de óxido se forma sobre las superficies limpias del acero expuestas al aire. Sin embargo, esta película no es impenetrable y si el agua o elementos corrosivos toman contacto con las superficies del acero se formarán manchas de grabado. Estas pronto evolucionan dando lugar a zonas de óxido profundo.

Las zonas de óxido profundo suponen un gran peligro para los rodamientos ya que pueden iniciar el desconchado y grietas. Los ácidos corroen el acero rápidamente, mientras las soluciones alcalinas son menos peligrosas. Las sales que están presentes en el agua dulce, junto con esta, constituyen un electrólito que causa corrosión galvánica, conocida como “grabado al agua”. El agua salada es por tanto muy peligrosa para los rodamientos.

Tabla 2.19. Óxido profundo.

Aspecto	Causa	Medidas
Trazos negro-grisáceos cruzan los caminos de rodadura, coincidiendo frecuentemente con los espacios entre elementos rodantes. En una fase más avanzada, picaduras en los caminos de rodadura y de otras superficies del rodamiento.	Presencia de agua, humedad o sustancias corrosivas en el rodamiento durante un largo período de tiempo.	Mejorar la obturación. Utilizar lubricante con mejores propiedades inhibidoras.

b) Corrosión de contacto

Si se perfora la fina película de óxido, la oxidación continuará más profundamente dentro del material. Un ejemplo de esto es la corrosión que acontece cuando existe movimiento relativo entre el aro del rodamiento y eje o soporte, a causa del ajuste demasiado flojo. Este tipo de daño se llama corrosión de contacto y puede ser relativamente profunda localmente. El movimiento relativo puede producir también pequeñas partículas de material que se llegan a desprender de la superficie. Estas partículas se oxidan rápidamente cuando quedan expuestas al oxígeno en la atmósfera.

Como consecuencia de la corrosión de contacto, los aros del rodamiento pueden no estar soportados uniformemente y esto tiene un desfavorable efecto sobre la distribución de la carga. Las áreas oxidadas también actúan como defecto de entalla.

Tabla 2.20. Corrosión de contacto.

Aspecto	Causa	Medidas
Zonas de óxido en la superficie externa del aro exterior o en el agujero del aro interior. Marca característica de camino de rodadura, duramente marcada en las posiciones correspondientes.	Ajuste demasiado flojo. Asientos en el eje o alojamiento con errores de forma.	Ajustar los asientos.

3.4.2.6. Avería producida por paso de corriente eléctrica

Cuando la corriente eléctrica pasa a través de un rodamiento, es decir, pasa de un aro a otro a través de los elementos rodantes, se producirán daños. El proceso en las superficies en contacto es similar al de soldadura por arco eléctrico.

El material se calienta alcanzando niveles de temperaturas desde temple hasta fusión. Esto conduce a la aparición de áreas descoloridas, variando en tamaño, donde el material ha sido templado, revenido o fundido. También se forman pequeños cráteres allí donde el material ha fundido.

El paso de corriente eléctrica conduce frecuentemente a la formación de estría (corrugados) en los caminos de rodadura de los rodamientos. Los rodillos también están sujetos a estas marcas, mientras sólo tiene lugar una oscura decoloración en las bolas.

Puede ser difícil distinguir entre fallo por corriente eléctrica y fallo por vibración. Una característica del estriado causado por corriente eléctrica es el fondo oscuro de la marca, opuesto al brillante o rojizo fondo del estriado producido por la vibración. Otra característica sobresaliente es la ausencia de fallo en los elementos rodantes cuando hay vibración.

Tanto la corriente alterna como la continua causan daño en los rodamientos. Incluso corrientes de baja intensidad son peligrosas. Los rodamientos que no giran ofrecen mucha más resistencia al daño por corriente eléctrica que los que giran. La magnitud de los daños depende de varios factores, tales como la intensidad de corriente, duración carga sobre el rodamiento, velocidad y lubricante.

La única forma de evitar daños es impedir cualquier paso de corriente eléctrica a través del rodamiento.

Tabla 2.21. Avería producida por paso de corriente eléctrica.

Aspecto	Causa	Medidas
Estrías (corrugados) o cráteres de color pardo oscuro o negro grisáceo en los caminos de rodadura y rodillos. Las bolas sólo presentan decoloración oscura. Algunas veces, quemaduras en zigzag en los caminos de rodadura de rodamientos de bolas.	Paso de corriente eléctrica a través del rodamiento mientras éste gira.	Desviar la corriente puenteando el rodamiento. Usar rodamientos aislados.
Quemaduras localizadas en los caminos de rodadura y sobre los elementos rodantes.	Paso de corriente eléctrica a través del rodamiento mientras está estacionado.	Desviar la corriente puenteando el rodamiento. Cuando se suelda, conectar a tierra para evitar el paso de la corriente a través del rodamiento. Usar rodamientos aislados.

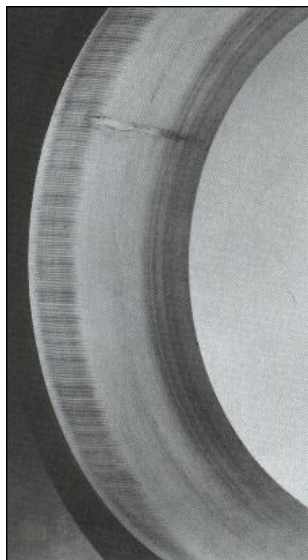


Figura 2.100. Estrías causadas por el paso de corriente eléctrica, en el aro exterior de un rodamiento de rodillos a rótula.

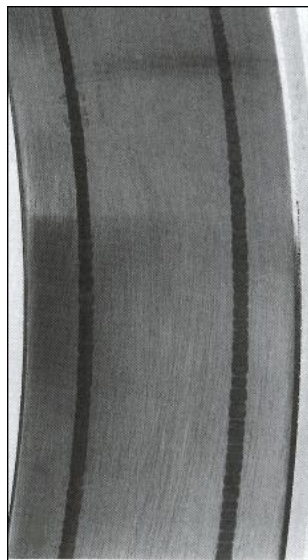


Figura 2.101. Aro exterior de un rodamiento de bolas a rótula, dañado por corriente eléctrica.

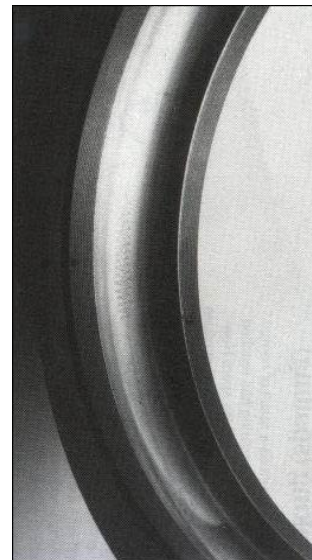


Figura 2.102. Rodamiento rígido de bolas con fallo por corriente eléctrica en forma de zigzag. Las quemaduras surgen cuando el paso momentáneo de corriente de alta intensidad está acompañado por vibración axial.

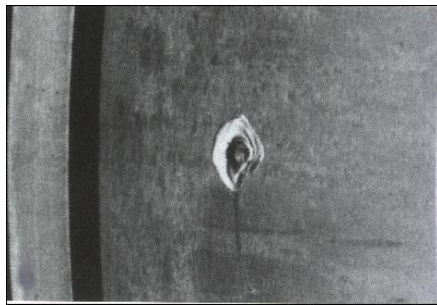


Figura 2.103. Un rodamiento de ferrocarril dañado en una pista por una corriente de alta intensidad mientras el rodamiento permanecía inmóvil.

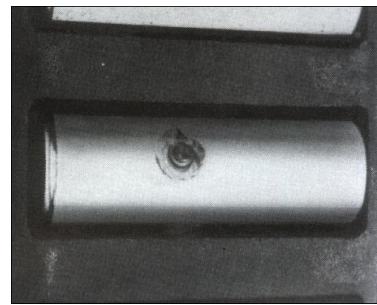


Figura 2.104. Rodillo de un rodamiento de ferrocarril dañado por la corriente eléctrica (mismo rodamiento que fig. anterior).

3.4.2.7. Desconchado o descascarillado

El período de tiempo que transcurre hasta que aparece el primer signo de fatiga en un rodamiento es función del número de revoluciones a que es sometido y de la magnitud de la carga. La fatiga es el resultado del esfuerzo de cortadura que surge cíclicamente, inmediatamente debajo de la superficie que soporta la carga. Después de algún tiempo, estos esfuerzos causan grietas que se extienden gradualmente hasta la superficie. Conforme los elementos rodantes alcanzan los fragmentos agrietados del material, rompen, esto es conocido como “*flaking*” o “*spalling*” (desconchado o descascarillado). El desconchado se incrementa progresivamente en extensión y finalmente deja del rodamiento inservible (Figura 2.105.).

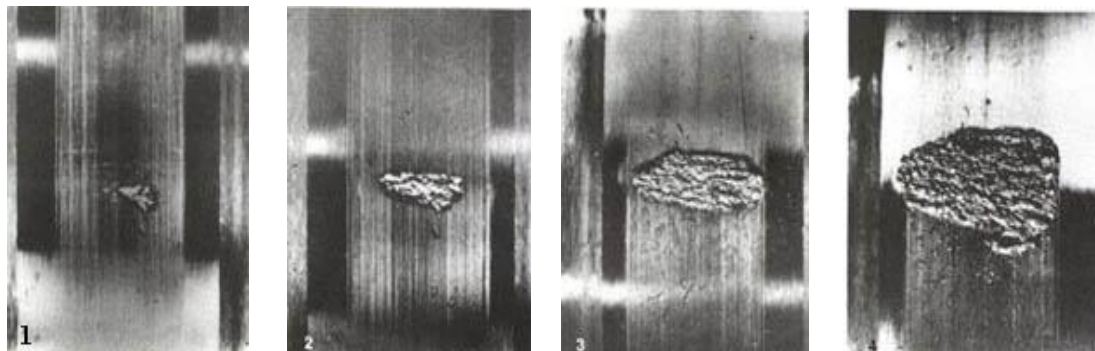


Figura 2.105. Fases progresivas del desconchado.

Sin embargo, esta no es la causa más corriente de desconchado. El descascarillado descubierto en rodamientos puede, generalmente, ser atribuido a otros factores. Si se descubre en una etapa inicial, cuando el deterioro no está demasiado extendido, frecuentemente es posible diagnosticar su causa y tomar medidas necesarias para evitar una repetición de la avería. La marca característica del rodamiento puede resultar útil.

Cuando el desconchado ha proseguido hasta un cierto nivel, hace notar su presencia en forma de ruido y vibración, lo que sirve como advertencia de que es el momento para sustituir el rodamiento.

Las causas de un desconchado prematuro pueden ser unas cargas externas demasiado elevadas, precargas a causa de ajustes incorrectos, excesivo calado en asiento cónico, ovalidad debida a error de redondez del asiento en eje o alojamiento, compresión axial como resultado de dilatación térmica, etc. El desconchado puede, también, estar causado para otros tipos de daño tales como muescas, corrosión profunda, corriente eléctrica perjudicial o adherencias.

Para una mejor comprensión de cómo se produce el desconchado o “*flaking*” se pueden observar las siguientes figuras, en las que se representan el proceso de desconchado producido por la aparición de microgrietas en la pista de rodadura y por una muesca en el rodamiento.

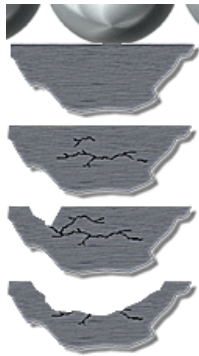


Figura 2.106. Evolución del proceso de desconchado desde la aparición de microgrietas internas hasta el desconchado de parte de la pista.

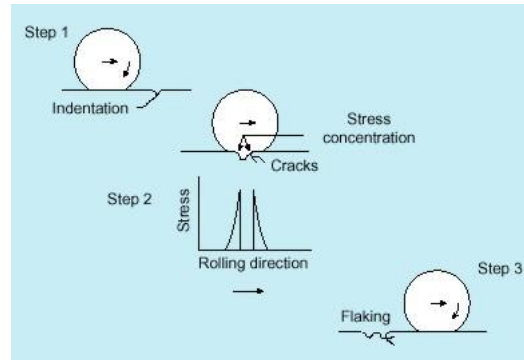


Figura 2.107. Inicio del proceso de desconchado. Se origina en el borde la muesca, que es donde se produce la mayor concentración de tensiones.

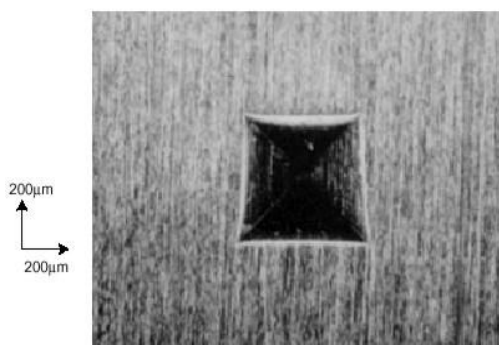


Figura 2.108. Vista inicial de la muesca producida en el rodamiento (x 36).

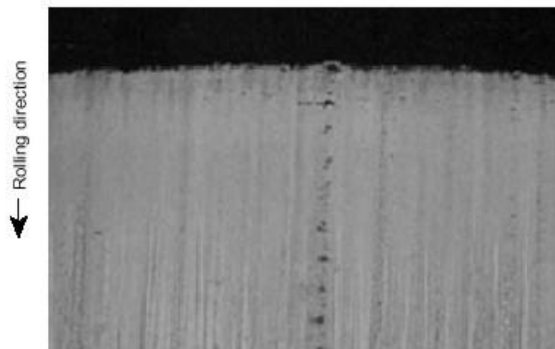


Figura 2.109. Borde de la muesca 2 horas después del comienzo, una pequeña grieta aparece a 20 micrómetros del borde, y se propaga paralelamente a este. (x 200).

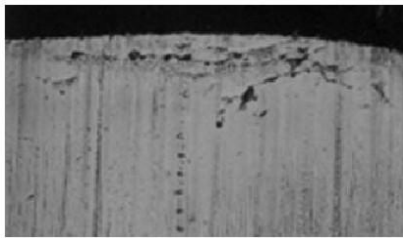


Figura 2.110. Borde de la muesca 8 horas después del comienzo, la grieta progresa en la dirección de funcionamiento, se comienza a ver un pequeño desconchado (x 200).

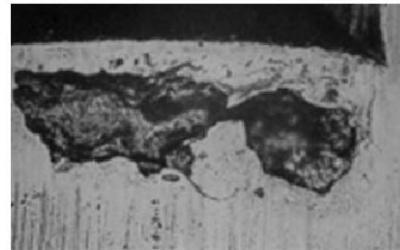


Figura 2.111. Borde de la muesca 12 horas después del comienzo, las grietas han progresado y emergen convirtiéndose en una gran área de desconchado (x 200).

a) Desconchado producido por precarga

Tabla 2.22. Desconchado producido por precarga.

Aspecto	Causa	Medidas
Huella firmemente señalada en los caminos de rodadura de ambos aros.	Precargas debidas a la existencia de ajustes demasiado fuertes.	Modificar el ajuste o seleccionar rodamientos con mayor juego interno.
Desconchado, normalmente en la zona más cargada.	Calado excesivo en asientos cónicos.	No calar el rodamiento excesivamente en su asiento cónico.
	Rodamientos de una hilera de bolas con contacto angular o de rodillos cónicos, ajustados con excesiva precarga.	Ajustar de nuevo los rodamientos para obtener precarga más ligera.
	Excesiva diferencia de temperatura entre aros interior y exterior.	Elegir rodamientos con mayor juego interno.

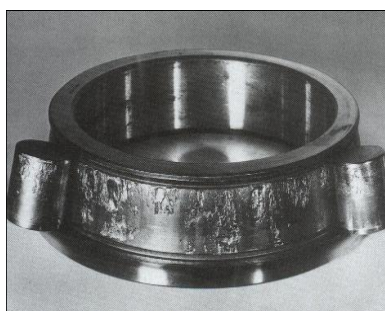


Figura 2.112. Pista interior y rodillos desconchados, en un rodamiento de rodillos cónicos. Las causas de esta avería son carga pesada y lubricación inadecuada.

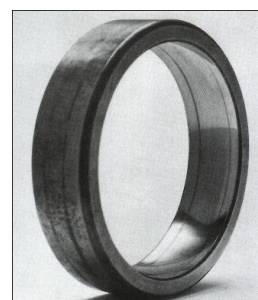


Figura 2.113. Aro exterior de un rodamiento de bolas a rótula que se ha calado demasiado en su asiento cónico. El rodamiento sólo había dado una pocas vueltas cuando fue detectado el daño. El desconchado podría haber sobrevenido pronto si el rodamiento hubiera seguido funcionando.

b) Desconchado producido por compresión oval

Tabla 2.23. Desconchado producido por compresión oval.

Aspecto	Causa	Medidas
Huellas firmemente señaladas en dos sectores diametralmente opuestos de cada aro del rodamiento. Desconchado en estos sectores.	<p>Asientos ovalados en eje o soporte. El último es un defecto corriente en soportes partidos y bastidores de máquinas.</p> <p>El agujero de los soportes de pie montados sobre una base desigual, se ovala cuando se aprietan los tornillos de la base.</p>	<p>Generalmente, es necesario fabricar un nuevo eje o soporte para solucionar el defecto. Una solución consiste en metalizar la pieza y volver a rectificarla. Si se trata de un eje ovalado con el rodamiento montado sobre un casquillo, es posible ajustar el eje mediante rectificado, en ciertos casos.</p> <p>Ajustar la base.</p>

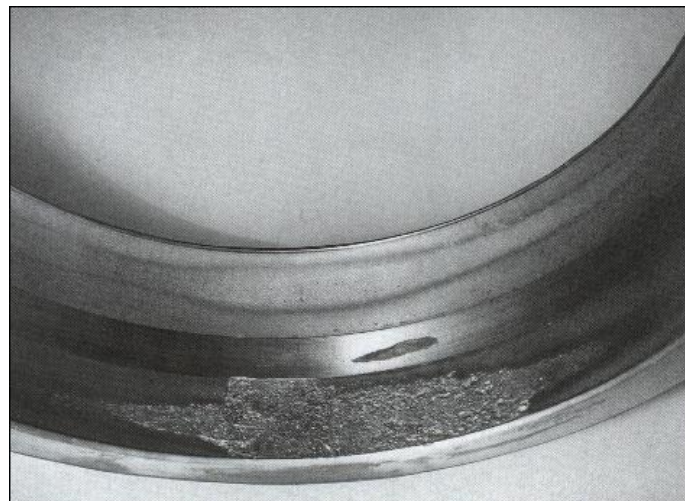


Figura 2.114. Desconchado del aro exterior de un rodamiento de rodillos a rótula que ha sido montado en un alojamiento ovalado.

c) Desconchado producido por compresión axial

Tabla 2.24. Desconchado producido por compresión axial.

Aspecto	Causa	Medidas
Rodamientos rígidos de bolas: huella firmemente marcada, desplazada en ambos aros.	Montaje incorrecto, que se traduce en carga axial, por ejemplo excesiva precarga de rodamientos de bolas con contacto angular y de rodillos cónicos.	Comprobar el ajuste al montar el rodamiento.
Rodamientos de bolas y de rodillos a rótula: huella firmemente marcada por una hilera de elementos rodantes.	El rodamiento libre se ha frenado.	Verificar el ajuste y lubricar las superficies.
Desconchado en estas zonas.	La libertad de movimiento axial no ha sido suficiente para absorber la dilatación térmica.	Si la diferencia de temperatura entre el eje y el alojamiento n puede reducirse, proporcionar una mayor libertad de movimiento.

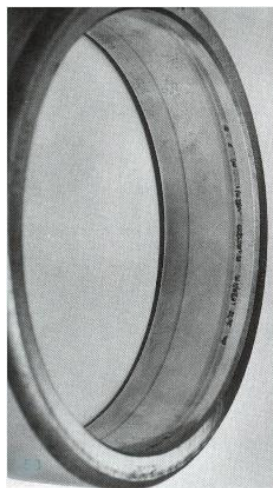


Figura 2.115. Aro exterior de un rodamiento de bolas a rótula sometido a excesiva carga axial. Desconchado en la zona cargada.

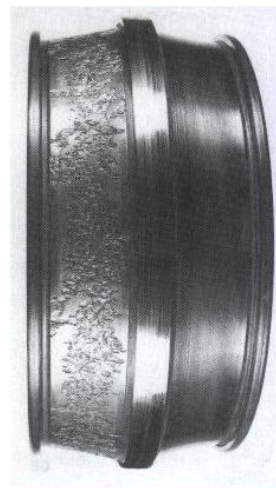


Figura 2.116. Aro interior desconchado de un rodamiento de rodillos a rótula. La extensión de las marcas, enteramente alrededor de uno de los caminos de rodadura, indica que la carga axial ha sido muy grande con relación a la carga radial.

d) Desconchado producido por desalineación

Tabla 2.25. Desconchado producido por desalineación.

Aspecto	Causa	Medidas
Rodamiento rígido de bolas: huella diagonal, firmemente marcada en dos sectores diametralmente opuestos.	Asientos de los rodamientos desalineados.	Corregir los asientos.
Rodamientos de rodillos cilíndricos: desconchado en el borde del camino de rodadura.	Rodamientos apoyados sobre superficies inclinadas.	Utilizar manguitos de montaje con las caras extremas paralelas.

e) Desconchado producido por muesca

Tabla 2.26. Desconchado producido por muesca.

Aspecto	Causa
Desconchado junto con muescas coincidentes con los espacios entre los elementos rodantes.	Muecas resultantes de montajes defectuosos o sobrecargas en rodamientos que no giran.
Desconchado junto con pequeñas muescas.	Muecas producidas por partículas extrañas.

f) Desconchado producido por adherencias

Tabla 2.27. Desconchado producido por adherencias.

Aspecto	Causa
Desconchado al comienzo de la zona de carga en los caminos de rodadura de rodamientos de rodillos.	Adherencias por arrastre.
Desconchado coincidiendo con el espacio entre rodillos en caminos de rodadura de rodamientos de rodillos.	Adherencias transversales por montaje defectuoso.

g) Desconchado producido por óxido profundo

Tabla 2.28. Desconchado producido por óxido profundo.

Aspecto	Causa
Desconchado originado por daños de corrosión.	Oxido profundo.

h) Desconchado producido por corrosión de contacto

Tabla 2.29. Desconchado producido por corrosión de contacto.

Aspecto	Causa
Desconchado en el camino de rodadura de uno u otro aro. Zona corroída en la parte correspondiente del agujero o superficie exterior.	Corrosión de contacto

i) Desconchado producido por acanaladuras o cráteres

Tabla 2.30. Desconchado producido por acanaladuras o cráteres.

Aspecto	Causa
Desconchado junto con acanaladuras o cráteres brillantes o corroídos. Desconchado junto con acanaladuras o cráteres oscurecidos o quemados.	Desgaste originado por vibraciones mientras el rodamiento permanecía inmóvil. Deterioro por paso de corriente eléctrica.

3.4.2.8. Grietas

Las grietas pueden formarse en los aros del rodamiento por varias razones. La causa más común es un trato brusco cuando el rodamiento está siendo montado o desmontado. Los golpes de mazo, aplicados directamente contra el aro o mediante un botado templado, pueden originar la formación de fina grietas, dando lugar a que trozos de dicho aro salten cuando el rodamiento se pone en funcionamiento. Otra causa del agrietamiento del aro es calar excesivamente sobre asiento cónico o manguito.

Los esfuerzos de tracción que surgen en los aros, como resultado de un calado excesivo, producen grietas cuando el rodamiento se pone en servicio. Se puede obtener el mismo resultado cuando los rodamientos se calientan y después se montan sobre ejes fabricados con tolerancias no adecuadas.

Las adherencias, descritas en una sección anterior, también pueden producir grietas, perpendiculares a la dirección del deslizamiento. Las grietas de esta naturaleza producen fracturas que cruzan los aros de parte a parte.

El desconchado, ocurrido por una u otra razón, actúa como una entalla y puede conducir al agrietamiento del aro del rodamiento. Lo mismo se aplica a la corrosión por contacto.

a) Grietas producidas por mal trato

Tabla 2.31. Grietas producidas por mal trato.

Aspecto	Causa	Medidas
Grietas o trozos desprendidos, generalmente en una cara del aro del rodamiento.	Golpes, con mazo o botador templado, dirigidos contra el aro cuando el rodamiento estaba siendo montado.	Usar siempre un botador blando o un manguito de montaje. No someter nunca el rodamiento a golpes directos.

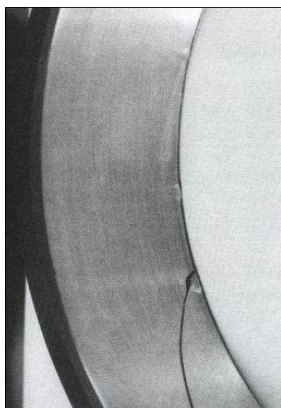


Figura 2.117. Fractura del aro exterior de un rodamiento de bolas a rótula. Las muescas visibles en el borde inferior del aro fueron causadas por un mal trato, originando la fisura en una de estas muescas.

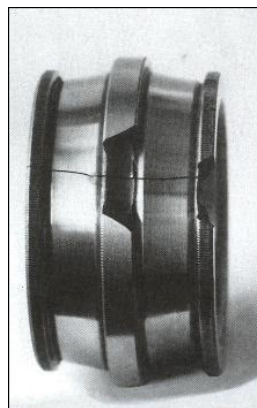


Figura 2.118. Fractura del aro interior de un rodamiento de rodillos a rótula. Uno de los rodillos ha sido extraído para permitir que el camino de rodadura en el lado izquierdo fuese examinado. El rodillo fue reinsertado con el martillo causando parte de la rotura de la pestaña central. Los impactos han sido transmitidos al camino opuesto a través de un rodillo, y parte de la pestaña también ha saltado. Al mismo tiempo el aro se ha fracturado transversalmente.

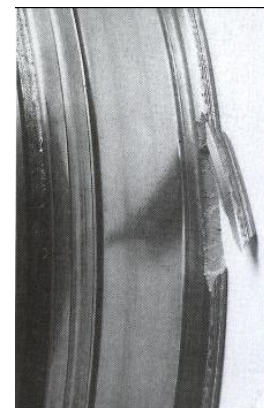


Figura 2.119. Aro interior de un rodamiento de rodillos a rótula con la pestaña exterior fracturada por golpes directos de martillo.

b) Grietas producidas ajuste excesivo

Tabla 2.32. Grietas producidas ajuste excesivo.

Aspecto	Causa	Medidas
Aro fracturado transversalmente, perdiendo su ajuste sobre el eje.	Excesivo apriete sobre asiento cónico o manguito. Ajuste de interferencia demasiado fuerte sobre asiento cilíndrico.	Seguir cuidadosamente todas las instrucciones de montaje para rodamientos de asiento cónico. Modificar el eje.

c) Grietas producidas por adherencias

Tabla 2.33. Grietas producidas por adherencias.

Aspecto	Causa
Grietas coincidentes con adherencias del aro del rodamiento. El aro puede haber roto transversalmente. Grietas generalmente perpendiculares a las adherencias.	Adherencia.

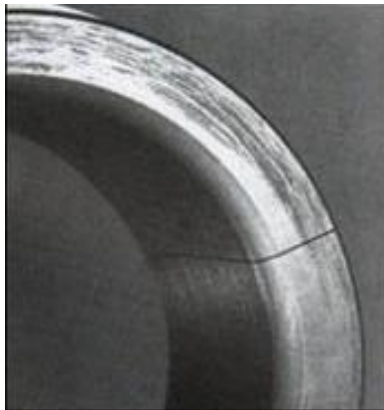


Figura 2.120. Aro interior de un rodamiento de rodillos a rótula fracturado transversalmente seguido de adherencias en una cara. El aro ha sido montado junto a un distanciador que no ha tenido un ajuste suficientemente fuerte sobre el eje. Consecuentemente, el distanciador ha girado con relación al eje y al aro del rodamiento.

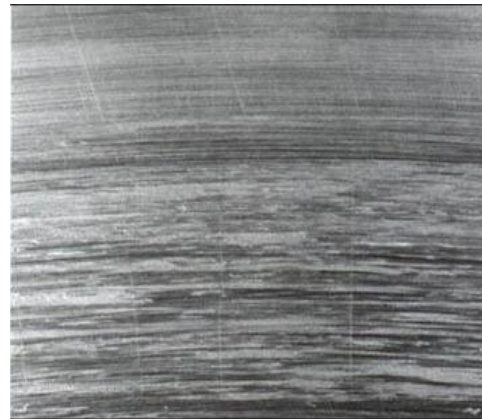


Figura 2.121. Daño por adherencias en la cara de un aro del rodamiento. Observar las grietas transversales incipientes.

d) Grietas producidas por corrosión de contacto

Tabla 2.34. Grietas producidas por corrosión de contacto.

Aspecto	Causa
Grietas transversales en aros interiores y, generalmente, longitudinales en aros exteriores, junto con corrosión de contacto.	Corrosión de contacto.

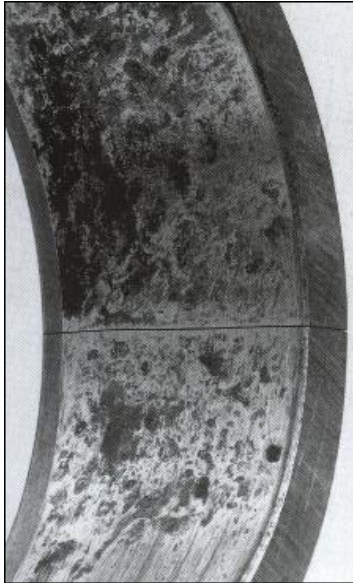


Figura 2.122. Aro interior de rodamiento de rodillos a rótula con corrosión de contacto y rotura transversal. La corrosión ha originado la rotura.

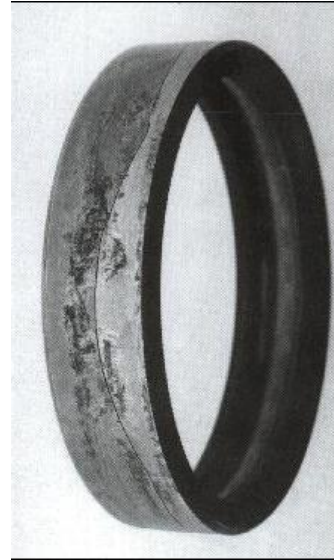


Figura 2.123. Rotura longitudinal de un aro exterior de rodamiento rígido de bolas, con corrosión de contacto.

3.4.2.9. Averías de la jaula

Si al examinar un rodamiento deteriorado se encuentra la jaula dañada puede, en muchos casos, resultar difícil establecer la causa. Generalmente, otros componentes del rodamiento están dañados también y esto hace mucho más difícil descubrir la razón de la avería. Sin embargo, hay ciertas causas de avería de la jaula, concretamente vibraciones, velocidad excesiva, desgaste y gripado.

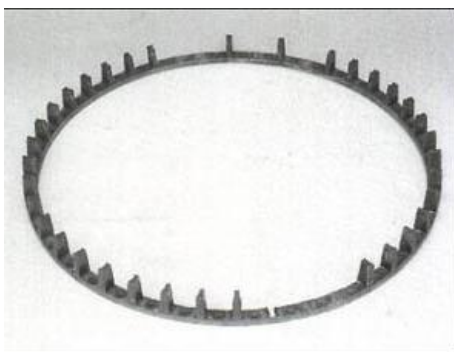


Figura 2.124. Jaula deteriorada de un rodamiento de rodillos a rótula. Alvéolos rotos por fatiga. Y vista en detalle de la rotura

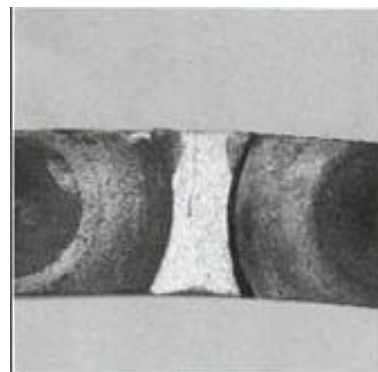


Figura 2.125. Vista en detalle de la rotura producida en la jaula de la figura anterior.



Figura 2.126. Jaula deteriorada de un rodamiento bolas. La rotura se ha producido debido a una pobre lubricación.

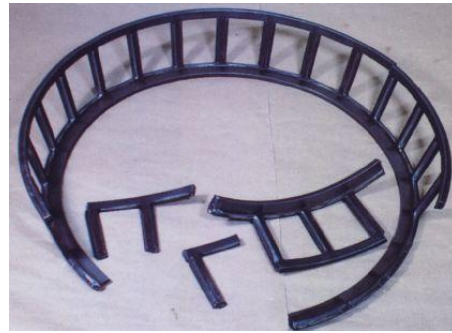


Figura 2.127. Jaula deteriorada de un rodamiento cónico.

a) Vibraciones

Cuando un rodamiento está expuesto a vibraciones, las fuerzas de inercia pueden ser tan grandes que originan fatiga y forman grietas en la jaula después de un cierto tiempo. Antes o después estas grietas producen la rotura de la jaula.

b) Velocidad excesiva

Si el rodamiento gira a velocidad mayor que la admitida por la jaula, esta es sometida a elevadas fuerzas de inercia que pueden producir fracturas. Frecuentemente, para velocidades muy altas es posible seleccionar rodamientos con jaulas de diseño especial.

c) Desgaste

El desgaste de la jaula puede ser originado por lubricación inadecuada o por partículas abrasivas. El propósito de los rodamientos es, por principio, evitar el rozamiento originado por el deslizamiento. Sin embargo, en lo que concierne a la jaula, el deslizamiento no puede ser eliminado en los contactos con los otros componentes del rodamiento. Esto explica por qué la jaula es el primer componente en ser afectado cuando la lubricación es inadecuada. La jaula siempre se fabrica de material más blando que los otros componentes y, consecuentemente, se desgasta más rápidamente. Como los alvéolos aumentan de tamaño debido al desgaste, las guías de los elementos rodantes se deterioran. Esto mismo también ocurre en los casos donde la jaula está centrada en los elementos rodantes. Las fuerzas resultantes pueden conducir al fallo de la jaula dentro de un corto espacio de tiempo.

d) Gripado

Los fragmentos de material desconchado y otras partículas duras pueden quedar encajados entre la jaula y elementos rodantes, impidiendo la rotación de estos sobre su propio eje. Esto produce el fallo de la jaula.

e) Otras causas de avería de la jaula

Si los aros de un rodamiento rígido de bolas se ajustan, sin alineación, uno respecto al otro, la huella de las bolas tiene forma ovalada. Si la jaula está centrada sobre las bolas, tiene que cambiar de forma por cada revolución que realiza. En el material se forman grietas por fatiga y, más tarde o más temprano, esto produce la fractura.

Se tiene un caso similar cuando un rodamiento axial de bolas se empareja con una rótula radial. Si el juego se incrementa en esta última, las arandelas del rodamiento llegan a desplazarse entre sí. Entonces las bolas no siguen su huella normal y se pueden alcanzar altas tensiones en las jaulas.

Las jaulas de rodamientos sujetos a fuertes aceleraciones y deceleraciones, asociadas con fluctuaciones de velocidad, son afectadas por fuerzas de inercia. Esto da lugar a considerables presiones entre las superficies en contacto, con el consiguiente fuerte desgaste.

3.4.3. Fases de rotura de rodamientos

ZONAS DEL ESPECTRO DE DEFECTOS

Una vez realizado el proceso de captación de la señal vibratoria generada por los rodamientos, si se obtiene la PSD de dicha señal, se consigue un espectro de potencia característico donde se pueden distinguir cuatro zonas distintas del espectro, como se muestra en la siguiente Figura 2.128.

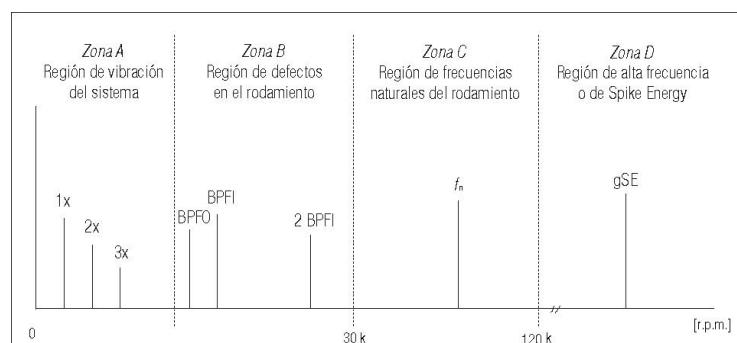


Figura 2.128. Espectro en frecuencia característico de la vibración generada por un rodamiento dañado. En el espectro se indican las cuatro zonas o regiones características.

- **Zona A.** *Región de la vibración del sistema.* Las vibraciones de los rodamientos relacionadas con el rotor se sitúan en un rango de frecuencia comprendido entre 0.25 y 3 veces la velocidad de rotación del eje de la máquina. Estos fallos están ligados a anomalías tales como el desequilibrio, el desalineamiento o la inestabilidad dinámica del rotor. Por otro lado, otros fallos también son posibles ya que el desgaste o la holgura en los rodamientos producen excentricidad en el eje.
- **Zona B.** *Región de los defectos en el rodamiento.* Esta banda corresponde al rango de frecuencias comprendidas entre la frecuencia de paso de elemento rodante (número de veces que un elemento rodante pasa por un punto de la pista interior o exterior) y siete veces esta frecuencia. Representa la banda que aporta mayor cantidad de información sobre el estado de deterioro de los rodamientos. En ella aparecen reflejados los picos debidos a los defectos en el rodamiento. Debido a que el 90% de los fallos de los rodamientos se deben a grietas en las pistas interiores o exteriores, que generan frecuencias en esta banda. El 10% restante son producidas por grietas en la caja de los rodamientos y dan lugar a frecuencias en la región de vibración del rotor.
- **Zona C.** *Región correspondiente a las frecuencias naturales de los componentes de los rodamientos.* Las medidas realizadas en esta región deben ser complementadas con medidas en las otras regiones ya que son más fiables. Esta zona nos proporciona una idea sobre el estado del defecto pero debemos complementarlas con las tomadas en las regiones anteriores para tener información de la naturaleza del defecto.
- **Zona D.** *Región de alta frecuencia o de Spike Energy.* Esta región cubre el rango de frecuencias más elevado. Esta región nos proporciona una clara idea de la evolución del defecto junto con una pronta identificación del defecto ya que es la primera zona en la que se advierten estos. El problema de esta zona es que es una región ultrasónica y requiere de un sensor especialmente diseñado para detectar frecuencias muy altas. Circuitos de filtros especiales dejan pasar sólo esta región de frecuencia.

3.4.4. Fases de fallo en los rodamientos

A medida que transcurre la vida en funcionamiento de un rodamiento, se va desarrollando un progresivo deterioro en él. Durante esta vida operativa se pueden distinguir, claramente, cuatro fases de fallo hasta que el rodamiento deja de ser útil. Recién instalado el rodamiento está en un estado normal en el cual no hay defectos debidos al rodamiento, únicamente se pueden ver picos debidos a fallos del eje tales como desequilibrio, desalineamiento,...

- **Fase 1.** En esta primera fase aparecen algunos picos en la región de alta frecuencia, con valores bajos (se mide en gSE). Estos valores varían en función del lugar de medición y de la velocidad de la máquina. Sin embargo, si se realiza una inspección física del rodamiento, en esta etapa, no observaremos defectos identificables, esto es debido a que las grietas generadas son microscópicas y, por lo tanto, no visibles al ojo humano. En esta etapa aún tenemos una cantidad de vida remanente del rodamiento considerable (Figura 2.129.).

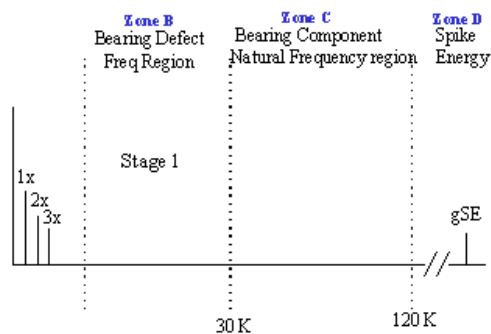


Figura 2.129. Fase 1 de la evolución del espectro de un rodamiento dañado.

- **Fase 2.** Comienzan a aparecer señales asociadas con las frecuencias naturales de resonancia de las partes de los rodamientos, zona C. Al final de esta etapa aparecen bandas laterales del pico de la frecuencia natural. Los niveles en zona D aumentan de intensidad. Además los defectos empiezan a aparecer si se inspecciona el rodamiento (Fig. 4-26).

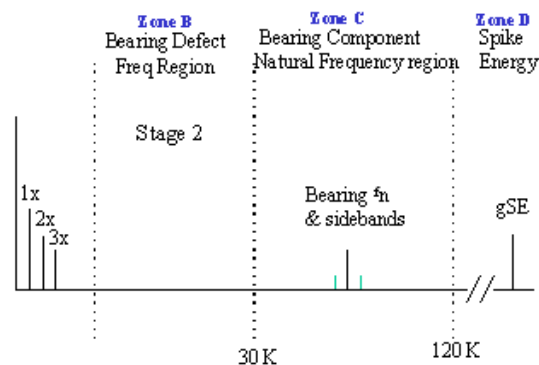


Figura 2.130. Fase 2 de la evolución del espectro de un rodamiento dañado.

- **Fase 3.** En esta fase ya aparecen representadas las frecuencias correspondientes a los defectos del rodamiento (zona B). También aparecen los armónicos correspondientes y aumenta el número de bandas laterales, tanto de las frecuencias de los defectos como de las frecuencias naturales (zona C). La Spike Energy (zona D) continúa creciendo. En este estado las grietas ya comienzan a ser visibles, además, se comienza a producir ruido y se eleva la temperatura del rodamiento. Este suele ser el momento más aconsejable para el recambio del rodamiento (Figura 2.131.).

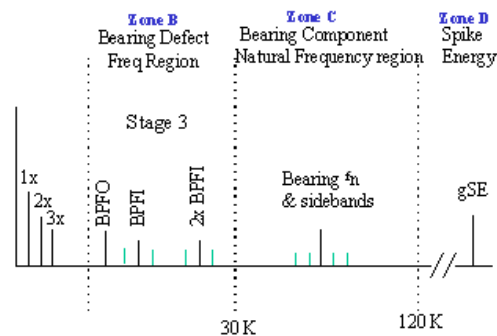


Figura 2.131. Fase 3 de la evolución del espectro de un rodamiento dañado.

- **Fase 4.** Esta fase es la que precede al fallo catastrófico del rodamiento. Debido al incremento de la degradación del rodamiento, el eje puede aumentar su vibración haciendo que aumente el pico correspondiente a $1x$ así como sus armónicos. En las zonas B y C (defectos del rodamiento y frecuencia naturales) los picos tienden a "desaparecer" y son reemplazados por otros aleatorios. En la zona D de alta frecuencia, el nivel de Spike Energy tiende a descender para aumentar en gran medida justo antes de producirse la rotura. En esta etapa el fallo ya es inminente, por lo que se elevan el ruido y la temperatura del rodamiento. La sustitución es indispensable (Figura 2.132.).

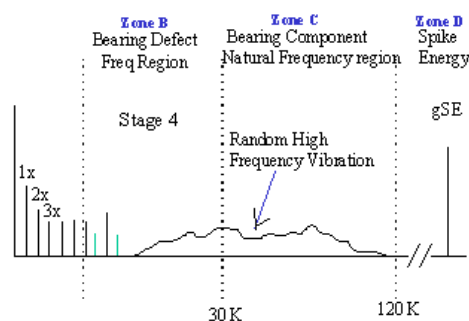


Figura 2.132. Fase 4 de la evolución del espectro de un rodamiento dañado.

El correcto funcionamiento de los rodamientos será muy importante ya que la fiabilidad de las instalaciones y la aparición de averías van a depender del estado de los rodamientos.

La duración de estos mecanismos dependerá de las cargas dinámicas que se generen y de las vibraciones que soporten, por esta razón se debe vigilar que no se produzcan averías que alteren su correcto funcionamiento.

Las frecuencias debidas a los defectos en los rodamientos no son múltiplo de la velocidad de rotación, como le ocurre a la mayoría de los fenómenos presentes en máquinas rotativas. Esta característica hace que puedan ser fácilmente identificables.

En cojinetes radiales de bolas o rodillos en mal estado, es decir que tienen elementos defectuosos, se genera vibración con una frecuencia muy alta e inestable, de amplitud baja, donde el cojinete de rodadura averiado será aquel que se encuentre más próximo a donde se producen las frecuencias más altas, es decir, la frecuencia a la que se produce la máxima amplitud da una idea del elemento defectuoso del rodamiento.

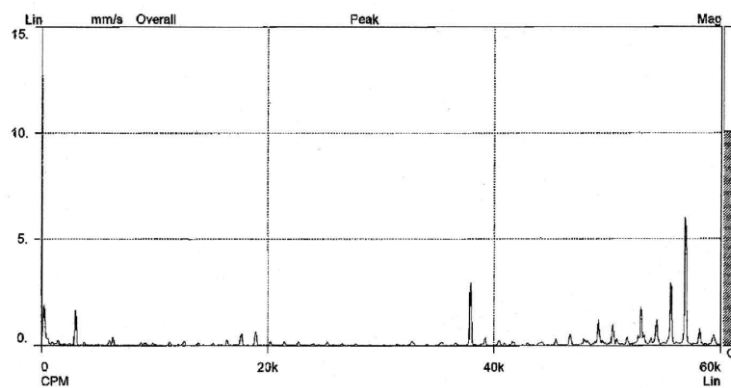


Figura 2.133. Espectro de velocidad de un rodamiento defectuoso.

Cualquier vibración precipita los daños en sus diferentes componentes rotacionales (o fijos) y como consecuencia reduce las horas de funcionamiento, pudiendo producir averías o colapso. Las frecuencias que se relacionan con anomalías en los diferentes elementos de un rodamiento son las siguientes:

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Tabla 2. 35. Frecuencias características de los distintos tipos de defecto generadas por los diferentes elementos de un rodamiento.

Defecto en la pista exterior de rodadura	$BPFO = \frac{Z}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \alpha \right)$
Defecto en la pista interior de rodadura	$BPFI = \frac{Z}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \alpha \right)$
Defecto en el elemento rodante	$BDF = \frac{PD}{BD} f_r \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \alpha \right)^2 \right)$
Defecto en jaula (o frecuencia fundamental del tren de vibraciones)	$FTF = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \alpha \right)$

Donde:

BPFO = Ball Pass Frequency Outer - Frecuencia de defecto en pista exterior.
 BPFI = Ball Pass Frequency Inner- Frecuencia de defecto en pista interior.
 BDF = Ball Defect Frequency - Frecuencia de defecto en elemento rodante.
 FTF = Fundamental Train Frequency - Frecuencia de defecto en jaula o arrastre.
 α = Angulo de contacto
 Z = Número de elementos rodantes (bolas o rodillos)
 f_r = Velocidad angular relativa entre pistas
 BD = Diámetro del elemento rodante
 PD = Diámetro de la circunferencia media (o diámetro “pitch” o de la jaula)

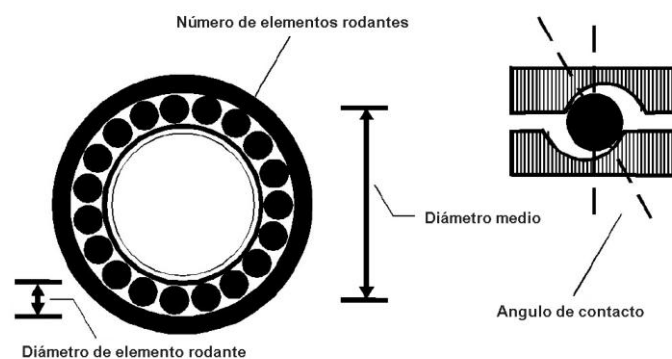


Figura 2.134. Parámetros básicos de un rodamiento para el cálculo de las frecuencias de cada tipo de defecto.



Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Las fórmulas definidas en la Tabla 2.35. suponen un defecto único, contacto rodante y que la pista interior es la que gira permaneciendo fija la exterior. Si las dimensiones del rodamiento no están disponibles, las frecuencias de defecto en las pistas interior y exterior se pueden aproximar como, respectivamente, el 60% y el 40% del número de elementos rodantes multiplicado por la velocidad de rotación.

Esta aproximación es posible porque el cociente entre el diámetro de elemento rodante y el diámetro medio es relativamente constante.

Las frecuencias son normalmente moduladas por disequilibrios residuales, los cuales producen bandas laterales a la frecuencia de rotación. Otras vibraciones también las pueden modular y el espectro, a menudo, contiene componentes que son sumas o diferencias de estas frecuencias.

A medida que aumenta el desgaste la vibración se convierte en algo más parecido a ruido y los picos se reducen o desaparecen porque aparecen defectos alrededor de toda la superficie.

Estas frecuencias pueden aparecer en el espectro de un rodamiento en buenas condiciones y no implica rotura incipiente.

El ángulo de contacto puede cambiar con carga axial, causando pequeñas desviaciones con respecto a las frecuencias calculadas.

Pequeños defectos en las pistas estacionarias que se encuentran fuera de la zona de carga suelen producir vibración notable sólo cuando se carga con fuerzas desequilibradas (por ejemplo, una vez por revolución).

OIL WHIRL Y OIL WHIP

Es un fenómeno que aparece, sobre todo, en los cojinetes provistos de lubricación en circuito cerrado a presión y que operan a velocidades altas. En ellos, el rotor es sustentado por una fina película de fluido, el cual circula a una velocidad de aproximadamente la mitad de la del rotor. Debido a la pérdida de viscosidad en el fluido, la presión antes del punto de mínima holgura es menor que detrás. Esta diferencia de presiones causa una fuerza de desestabilización tangencial, en la dirección de la rotación, que da como resultado un remolino a una velocidad ligeramente inferior a la mitad de la velocidad de rotación del rotor (entre 0.43 y 0.48).

Este tipo de defecto presentará un diagrama de espectro en cascada parecido al de la Figura 2.135., la frecuencia de la vibración correspondiente al "oil whirl" es la respuesta de aproximadamente $0.5x$ y como al coincidir con una velocidad crítica se produce la resonancia y el fenómeno de "oil whip". Esto releva que los daños pueden llegar a ser graves, si la velocidad de funcionamiento de la máquina tiene un valor cercano al doble de la velocidad crítica del sistema.

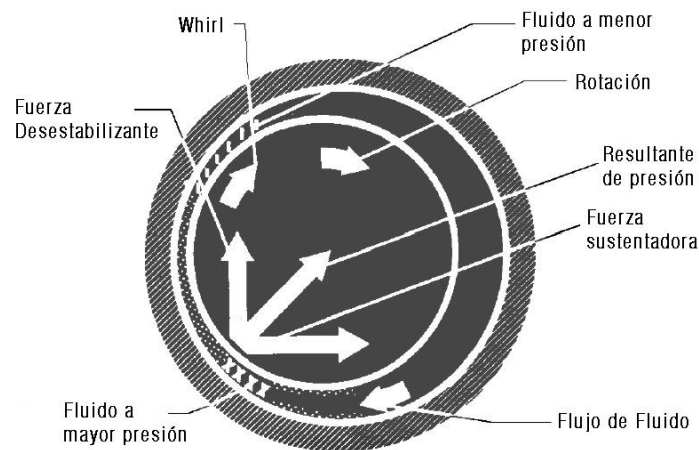


Figura 2.135. Esquema de un cojinete en el se produce el fenómeno de oil whirl.

La vibración producida por este efecto es autoexcitada, es decir, se alimenta del movimiento del propio eje, de forma que una vez que se inicia este fenómeno las fuerzas centrífugas de este eje son amplificadas y éstas, a su vez, realimentan las consecuencias de este fenómeno.

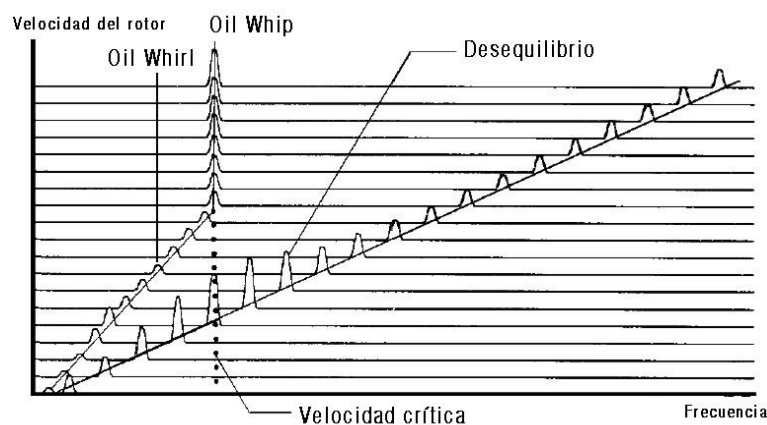


Figura 2.136. Mapa del espectro en cascada de un cojinete en el que se ha producido el fenómeno de oil whirl que se ha convertido en el fenómeno de oil whip al alcanzar el eje el doble de la velocidad crítica.



Otras causas de vibraciones en maquinas son los problemas eléctricos, problemas en la impulsión de correas, flojedad mecánica, rozamiento del rotor o resonancia. Estas causas no se detallaran en esta memoria, pero se incluyen en la tabla resumen para dar una idea de sus causas.

3.5 Tablas resumen

Una vez descritos los principales defectos que se pueden producir en las máquinas se presenta una tabla a modo resumen (Tabla 2.36.) de la mayoría de los defectos que se pueden producir en las máquinas. Esta tabla facilita la consulta rápida para una aproximación inicial al tipo de defecto producido. También se presenta otra tabla (Tabla 2.37.) en la que se identifican los picos correspondientes a una cierta frecuencia con el posible defecto a que son debidos.

Capítulo II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Tabla 2.36. Identificación de causas de vibraciones en sistemas rotativos.

Causa	Frecuencia	Amplitud - Presentación	Observaciones
Desequilibrio	1 x	Proporcional al desequilibrio. Aumenta con la velocidad. Casi siempre en dirección radial.	Es la causa más frecuente de vibraciones. Se le puede confundir con desalineamiento, holguras o resonancias.
Desalineamiento, eje deformado (flexado)	1 x normal 2 x o 3 x algunas veces	Grande en dirección axial, 50% o más en radial. Pueden aparecer picos a frecuencias hasta 5 x.	Óptimo para aparición de largas vibraciones axiales. Para diagnóstico usar indicadores de fase. Si no hay desalineamiento en los cojinetes equilibrar rotor.
Velocidad crítica	1 x	La amplitud de la vibración alcanza el máximo a una velocidad y después disminuye. Ocurre si la velocidad operacional de la máquina coincide con la frecuencia natural del rotor.	Evitar la velocidad de operación a esa velocidad. Si no, modificar la rigidez de los cojinetes o la masa del rotor o de los acoplamientos.
Resonancia estructural	1 x	La amplitud de la vibración alcanza el máximo a una velocidad y después disminuye. Sucede si cualquier elemento estructural tiene su frecuencia propia igual o muy próxima a la velocidad operacional.	Modificar la rigidez, la masa, o incrementar el amortiguamiento.
Fallos en rodamientos	BPFO, BPFI, BDF, FTF.	Se identifica el rodamiento averiado como aquel más próximo a donde se producen las altas frecuencias.	Niveles irregulares, a veces con choques.
Desgaste de cojinetes. Excesivo	1 x y subarmónicos	Valores altos de 1 x y de 1/2 x, a veces 1/3 x ó más.	Golpeteos causados por impactos en los cojinetes.
Torbellino de aceite. Oil Whirl	0.43-0.48 x	La amplitud de la vibración no es muy significativa, a no ser que el régimen se aproxime a la frecuencia de resonancia. Se producen en dirección radial.	Aplicable a máquinas de alta velocidad. Aparece repentinamente y desaparece al reducir la velocidad.
Grieta transversal en el eje	1 x y 2 x	Mayor amplitud en 2 x que en 1 x y de magnitud casi igual en todas direcciones.	Sin vibración aparente en dirección axial.
Engranaje defectuoso	nº dientes · ω	Baja amplitud de la vibración y frecuencias altas. Se producen tanto en dirección radial como axial.	Pueden aparecer bandas laterales que indican modulación. Sólo detectables con análisis de banda muy estrecha.
Holgura mecánica	2 ω	También aparecen subarmónicos.	Usualmente acompañado con desequilibrio y/o desalineación.
Transmisión por correa defectuosa	1, 2, 3 y 4 · ω de correas	Vibración axial muy alta y vibración radial inestable, mayor en 1 x que en 2 x.	Errática o pulsante. El problema se puede identificar a simple vista, con ayuda de un estroboscopio.
Eléctrica	1 x ó 2 · frecuencia de la red	Se puede presentar tanto en dirección radial como en axial. Desaparece al cortar la corriente.	Si la amplitud de vibración cae instantáneamente cuando desaparece la corriente, la causa es eléctrica.
Fuerzas hidráulicas y aerodinámicas	1 x ó nº de palas del ventilador o impulsor · ω	Siempre presentes en el espectro de la señal de vibración de toda máquina que disponga de un número discreto de piezas móviles.	No suelen causar problemas excepto en los casos de resonancia.
Fuerzas alternativas	1, 2 y órdenes mayores · ω	Se presenta sólo en dirección radial.	Propio de máquinas alternativas. Solamente puede reducirse con cambios de diseño o aislamiento.

Tabla 2.37. Frecuencias de vibración relacionadas con sus posibles causas

Frecuencia	Posible causa
1 x	Desequilibrio
	Desalineamiento o eje flexado
	Fatiga
	Holguras
	Resonancia
	Fallos eléctricos
2 x	Desalineamiento o eje flexado
Armónicos	Holguras
	Contacto entre eje y alojamiento
Subarmónicos	Oil Whirl
	Defecto en jaula de rodamiento
M · ω	Defectos en rodamientos
	Defectos en engranajes
	Defectos en correas
	Defectos en aspas o hélices
k · frecuencia de red	Eléctrico
Resonancia	Causas diversas

En las Tablas 2.36 y 2.37. se utiliza la siguiente notación:

- 1 x, 2 x: Indican 1, 2,... veces la velocidad de rotación.
- M: Valores variables según el tipo de defecto y la geometría del rodamiento.
- k = 1, 2, 3,...

Capítulo III:

DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN



III. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describirá en qué consiste la aplicación ADEVI3.1 y, para ello, se expondrán las instrucciones que se han utilizado con comentarios que faciliten su comprensión.

La aplicación ADEVI3.1 se ha creado en el programa MATLAB versión 7.0. Se eligió MATLAB 7.0. porque es una herramienta de alto nivel que, en este caso, resulta más útil que los lenguajes de programación convencionales, como Fortran, Pascal, C/C++, Java o Visual Basic.

El entorno de trabajo de MATLAB es muy gráfico e intuitivo, similar al de otras aplicaciones profesionales de **Windows**.

Para elaborar un programa interactivo y con aplicaciones visuales se ha empleado el módulo GUIDE, que en la versión 7.0. de MATLAB es mucho más fácil de manejar que en versiones anteriores.

El objetivo principal del uso de esta aplicación es crear un programa muy visual, orientado a facilitar la comprensión y representación de los cálculos y gráficas necesarios para el análisis de vibraciones de un ensayo dado, así como la simulación de vibraciones por defecto en un rodamiento tanto en su pista interior como exterior o como en el elemento rodante.

A través de las ventanas generadas en el programa se despliega un interfaz gráfico que facilita la actuación del usuario que no necesitará realizar cálculos ni gráficas adicionales para interpretar la señal vibratoria ni el defecto del elemento a estudiar.



2. CARACTERÍSTICAS DE MATLAB 7.0

MATLAB 7.0. es una de las aplicaciones más útiles que existen en cuanto a programaciones técnicas en las distintas materias de ingeniería.

Permite crear nuestras propias funciones y programas especiales, abarcando áreas tales como análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal como visualizaciones gráficas en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados sin necesidad de la programación tradicional.

El proyecto se ha realizado con MATLAB versión 7.0. por dos razones:

- a) Haber sido el utilizado por la persona que realizó la primera parte de este trabajo[22], ya que la labor de este proyecto ha consistido en mejorar y desarrollar la aplicación creada por dicha persona.
- b) El programa MATLAB 7.0 contiene importantes ventajas respecto de las versiones anteriores:
 - Ayuda y entorno de desarrollo mejorados.
 - Mejoras en debugger, que permiten establecer puntos de parada de ejecución condicional.
 - Posibilidad de comentar bloques de sentencias.
 - Dispone de otros tipos de variables distintos de *double*, aunque MATLAB trabaja por defecto con variables *double*, existe también la posibilidad de definir variables enteras de distinto rango, así como variables reales de simple precisión y variables lógicas.
 - Cuenta con la función *linsolve*, que permite optimizar la resolución de sistemas de ecuaciones lineales, lo que es quizás la tarea más utilizada de MATLAB.
 - Ofrece nuevos tipos de funciones, en concreto las funciones *inline*, las funciones anónimas y las funciones anidadas.
 - Es capaz de ejecutar funciones programadas en C como librerías externas o ficheros MEX.
 - Las funciones de dibujo simplificadas en 2D (*ezplot* y *ezpolar*) y en 3D (*ezplot3* y *ezsurf*).



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

- Nuevas ventanas gráficas, con muchas más posibilidades de control interactivo de las propiedades.
- Amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones.

Para realizar la aplicación, se complementará el uso de MATLAB 7.0. con su menú de construcción interactivo de interfaces, GUIDE.

3. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”.

Se puede arrancar como cualquier otra aplicación de **Windows**, con doble clic en el icono correspondiente en el escritorio (Figura 3.1.) o por medio del menú **Inicio**.



Figura 3.1. Icono de MATLAB 7.0.

Al arrancar MATLAB se abre una ventana similar a la mostrada en la Figura 3.2.

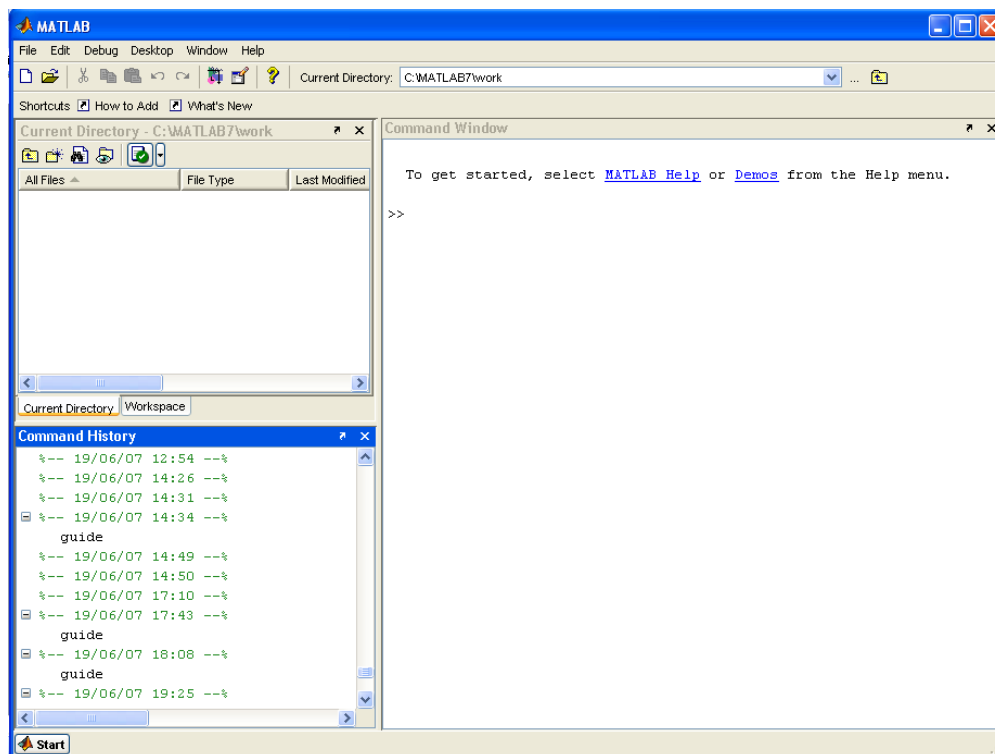


Figura 3.2. Ventana inicial de MATLAB 7.0.



3.1. Explicación de la pantalla, zonas y objetos

La parte más importante de la ventana inicial es la *Command Window*, que aparece en la parte derecha y ocupa el mayor espacio. En esta sub-ventana es donde se ejecutan los comandos de MATLAB, que se introducen mediante el teclado una vez que se muestra el puntero (*prompt*) característico (`>>`), que indica que el programa está preparado para recibir instrucciones.

En la parte izquierda de la pantalla aparecen dos ventanas también muy útiles: la superior es doble: *Current Directory* y *Workspace*, que se activan y superponen eligiendo la pestaña correspondiente. *Current Directory* muestra los elementos contenidos en la carpeta que se está manejando; desde la *Command Window*, o desde la propia ventana (o desde la barra de herramientas, debajo de la barra de menús) con los métodos de navegación de directorios propios de *Windows*. Haciendo doble clic sobre alguno de los ficheros **.m* del directorio activo se abre el *editor de ficheros* de MATLAB, herramienta fundamental para la programación. *Workspace* contiene información sobre todas las variables que se hayan definido en esta sesión y permite ver y modificar las matrices con las que se esté trabajando.

En la parte inferior se encuentra *Command History* que detalla los últimos comandos ejecutados en la *Command Window*. Estos comandos se pueden volver a ejecutar haciendo doble clic sobre ellos. Al pulsar en un comando con el botón derecho del ratón se despliega un menú contextual con las posibilidades disponibles en ese momento. Para editar uno de estos comandos hay que copiarlo antes en la *Command Window*.

En la parte inferior izquierda de la pantalla aparece el botón *Start*, con una función análoga a la del botón *Inicio* de *Windows*. *Start* da acceso inmediato a ciertas capacidades del programa. La Figura 3.3 muestra las posibilidades de *Start/MATLAB*, mientras que la Figura 3.4 indica las opciones de *Start/Desktop Tools*, que permiten el acceso a los principales componentes o módulos de MATLAB. El menú *Desktop* realiza un papel análogo al botón *Start*.

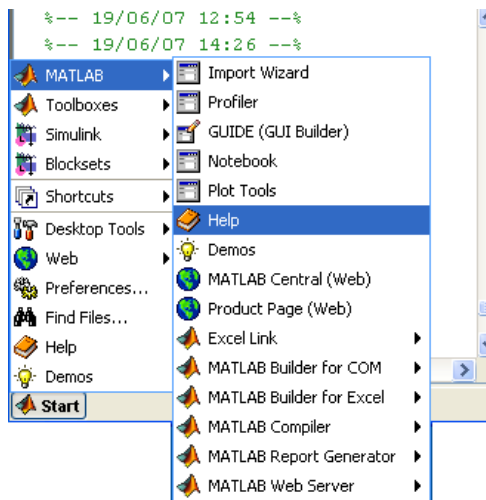


Figura 3.3. Menú Start/MATLAB

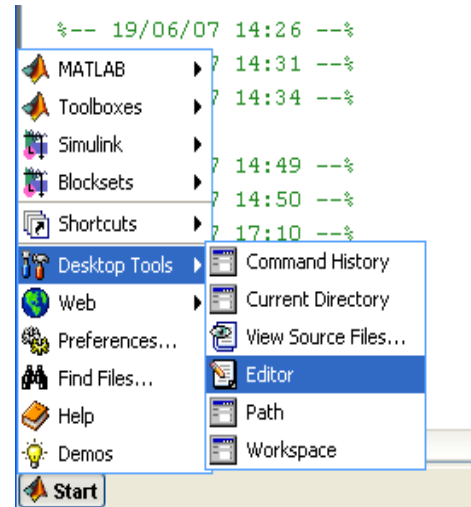


Figura 3.4. Menú Start/ Desktop Tools

Otro modo de recuperar comandos anteriores de MATLAB y moverse por ellos es con el ratón y con los cursores \uparrow y \downarrow . Al pulsar la primera de dichas flechas aparecerá el comando que se había introducido inmediatamente antes. De modo análogo es posible moverse sobre la línea de comandos con las teclas \leftarrow y \rightarrow . Ir al principio de la línea con la tecla **Inicio**, al final de la línea con **Fin**, y borrar toda la línea con **Esc**. Recuerdese que sólo hay una línea activa (la última).

Para borrar todas las secuencias anteriores de MATLAB y dejar limpia la **Command Window** se pueden utilizar las funciones **clc** y **home**. La función **clc** (clear console) elimina todas las salidas anteriores, mientras que **home** las mantiene, pero recoloca el puntero (**prompt**) ">>" en la primera línea de la ventana.

Si se desea salir de MATLAB basta teclear los comandos **quit** o **exit**, elegir **Exit MATLAB** en el menú **File** o utilizar cualquiera de los medios de terminar una aplicación en **Windows**.

Para poder conocer mejor el programa MATLAB 7.0., éste dispone de una excelente ayuda (**Help**) con la que se puede encontrar la información que se desee. La mayor parte de las páginas de ayuda están en formato HTML. Se accede al **Help** de distintas maneras como se ve en la Figura 3.5.

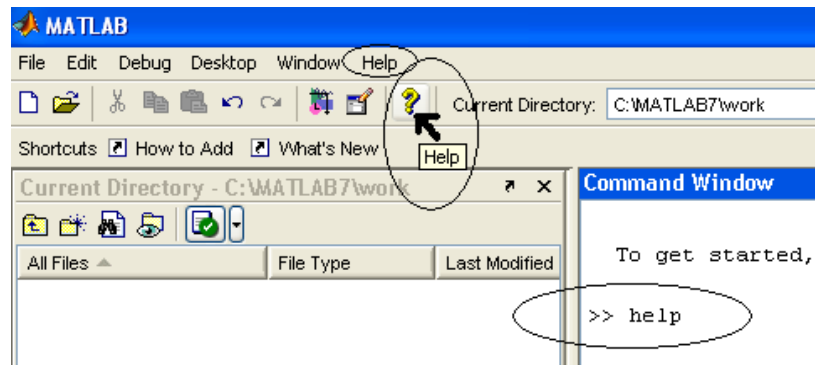


Figura 3.5. Distintas maneras para acceder al Help.

3.2. Funcionamiento del módulo GUIDE. Creación del modo interactivo para usuarios del programa

El área **Current Directory** muestra las carpetas, archivos que guardan variables, que pueden ser matrices, vectores o escalares y los ficheros “.m” y “.fig” que se encuentran en la carpeta activa. Los archivos “.m” y “.fig” los crea la aplicación GUIDE, el archivo “.m” es el ejecutable y el “.fig” la parte gráfica.

Para acceder al módulo GUIDE, que es el que permite crear el interfaz de usuario de modo interactivo, se puede hacer de dos maneras como se muestra en la Figura 3.6.

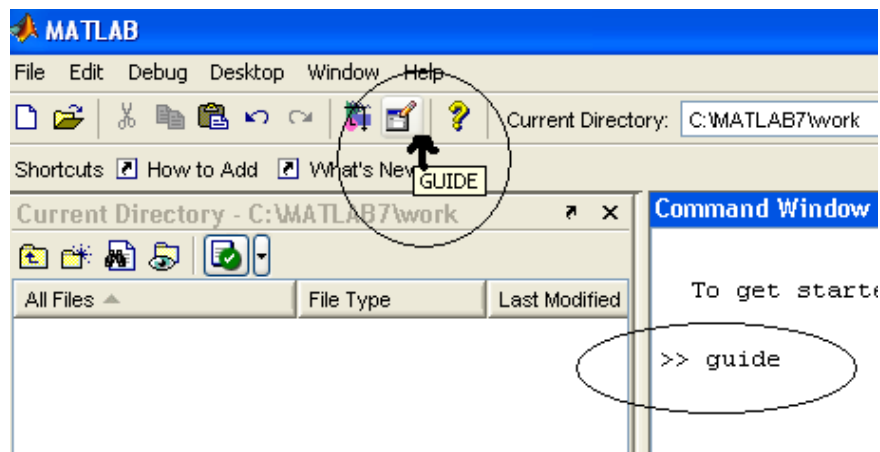


Figura 3.6. Formas de acceso a GUIDE

Al entrar en el módulo GUIDE aparece el cuadro de diálogo reflejado en la Figura 3.7.

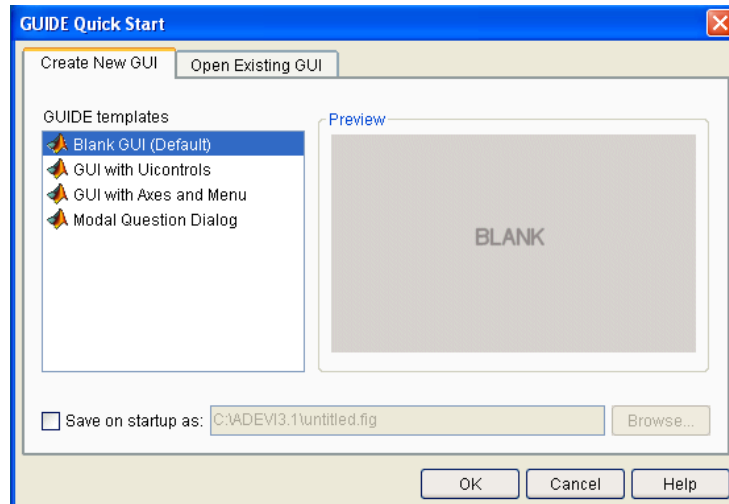


Figura 3.7. Ventana inicial de GUIDE

Para crear una nueva ventana hay que operar en la pestaña *Create New GUI* (Fig. 3.7), mientras que si lo que se quiere es modificar una ventana ya creada habría que ir a la pestaña *Open Existing GUI* y una vez allí con el buscador acceder al archivo que se quiere modificar. En la pestaña *Create New GUI* existen varias opciones:

➤ **Blank GUI (Default)**

La opción de interfaz gráfica de usuario en blanco (viene predeterminada), nos presenta un formulario nuevo, en el cual podemos diseñar nuestro programa.

➤ **GUI with Uicontrols**

Incorpora una rutina para calcular la masa, dada la densidad y el volumen, en alguno de los dos sistemas de unidades, con lo que si el programa necesita hacer este tipo de cálculo, el programador puede evitar su diseño integrando el del propio Matlab.

➤ **GUI with Axes and Menu**

Ofrece un menú File con las opciones Open, Print y Close. En el formulario tiene un Popup menú, un push button y un objeto Axes, se puede ejecutar el programa eligiendo alguna de las seis opciones que se encuentran en el menú desplegable y haciendo clic en el botón de comando.

➤ **Modal Question Dialog**

Con esta opción la pantalla despliega un cuadro de diálogo común, el cual consta de una pequeña imagen, una etiqueta y dos botones: Yes y No. Dependiendo del botón que se presione, el GUI retorna el texto seleccionado (la cadena de caracteres “Yes” o “No”).








En este proyecto la opción que se ha cogido es **Blank GUI (Default)** y el programa MATLAB muestra la ventana que se ve en la Figura 3.8., llamada *Guide Control Panel*.



Figura 3.8. Entorno de diseño del GUI, Guide Control Panel

Asimismo, se tienen las siguientes herramientas:

Tabla 3.1. Herramientas que se encuentran en el GUI.

	Alinear objetos
	Editor de menú
	Editor de orden de etiqueta
	Editor del M-file
	Propiedades
	Navegador
	Grabar y ejecutar

De todas estas herramientas, las que se han utilizado a lo largo de la elaboración del proyecto han sido tres, que se explicarán a continuación.

- Alinear objetos o *Align Objects*, se utiliza para que los controles programados en el módulo GUIDE aparezcan alineados o distribuidos, la pantalla de control de este editor es fácil de manejar debido a su presentación que es muy intuitiva.

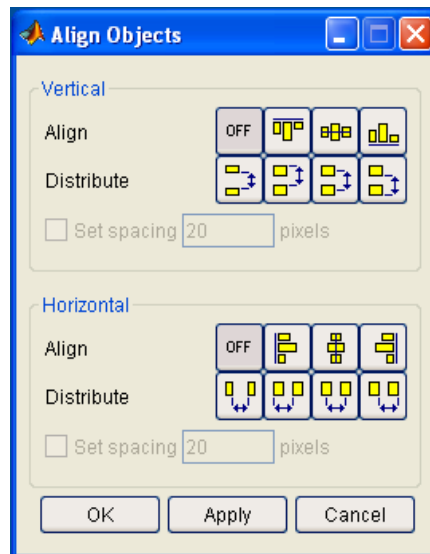


Figura 3.9. Editor de alineación de objetos.

- Editor de menús o **Menú Editor**, permite crear, borrar o editar menús, así como sus nombres y acciones, a través de una ventana de muy fácil manejo mostrada en la Figura 3.10., se obtiene esta imagen pinchando en el icono superior de la izquierda (**New Menu**) y luego en la pestaña de Menu Bar con doble clic en **Untitled1**.

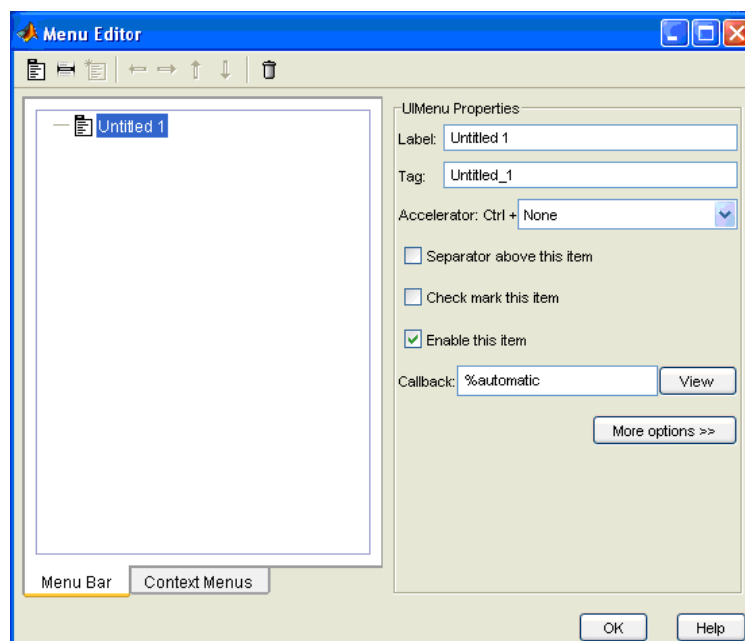


Figura 3.10. Editor de menús.

- Propiedades o *Property Inspector*, se utiliza para modificar propiedades de los diferentes elementos creados a través del GUIDE, incluso también en la propia ventana que se está diseñando.

Todos los objetos de MATLAB tienen distintas propiedades. Algunas de éstas son el tipo, el estilo, si es visible o no, y otras particulares en función del objeto concreto empleado.

Algunas de las propiedades comunes a todos los objetos son: Type, UserData, Visible y Tag. Otras son específicas de un tipo determinado de objeto.

Las propiedades tienen valores por defecto, que se utilizan siempre que el usuario no indique otra cosa. Es posible cambiar las propiedades por defecto y también devolverles su valor original. El usuario puede consultar los valores de las propiedades de cualquier objeto. Algunas propiedades pueden ser modificadas y otras no (read only). Hay propiedades que pueden tener cualquier valor y otras que sólo pueden tener un conjunto limitado de valores (por ejemplo, on y off).

Existen diversas posibilidades de modificar alguna de las propiedades de un objeto, las formas más importantes son:

- Iconos de menús desplegables en los que aparecen las opciones posibles sobre esa propiedad en concreto.
- Iconos con ventana complementaria (color,...).

Por último, existe también la posibilidad de escribir en columnas el texto que aparecerá en la figura. Hay casillas en las que no hay ningún icono y en las cuales la alteración de la propiedad se hace manualmente. Todos estos tipos se pueden apreciar en la Figura 3.11.

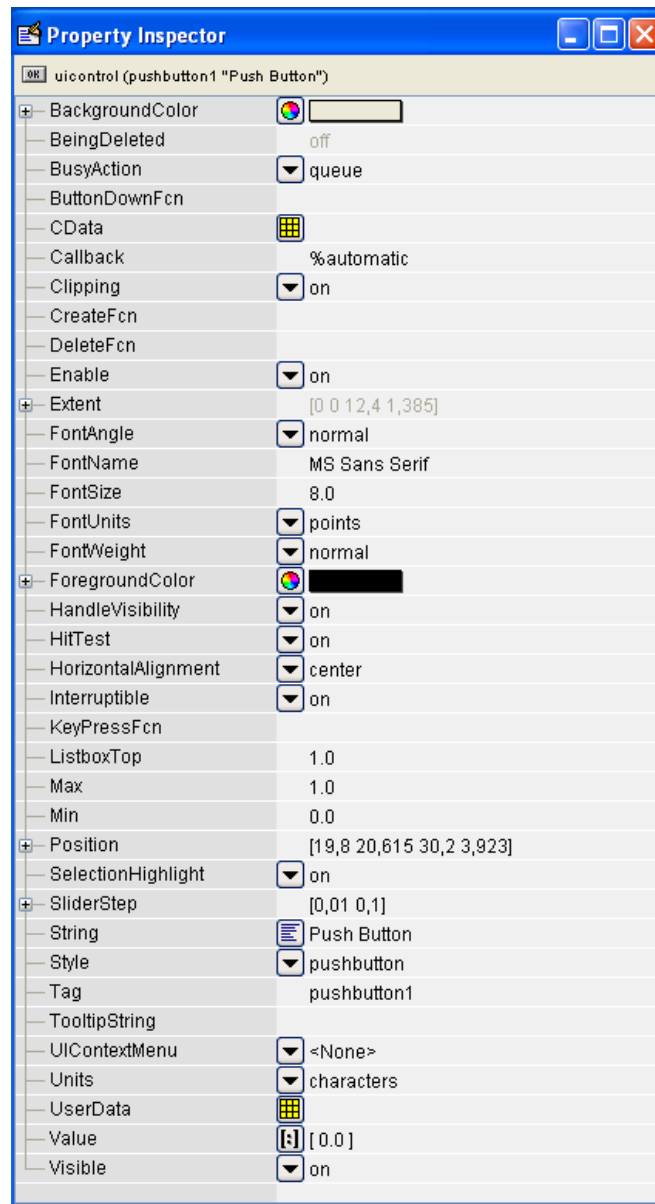


Figura 3.11. Ventana del editor de propiedades.

Es posible seleccionar varios objetos y establecer sus propiedades conjuntamente (las que tenga sentido hacerlo, como por ejemplo el color, el tamaño, etc.).

La ventana del editor de propiedades ha sido el bloque más utilizado en la programación de la aplicación “ADEVI3.1”. A continuación se explican las propiedades más importantes/usadas:

- *String*. El texto escrito es el que se muestra en la ventana final en el componente correspondiente al editor de propiedades que se está modificando. El programa por defecto pone el texto que indica qué tipo de control es (botones, botones de opción/selección, cajas de texto, listas de selección, menús pop-up).
- *Tag*. Un nombre interno para el objeto. No lo ve el usuario, pero se utiliza en programación para localizar un determinado objeto. GUIDE asigna un tag por defecto a cada objeto que se crea. Este nombre puede ser sustituido por otro.
- *Style*. La clase de objeto de que se trata (pushbutton | togglebutton | radiobutton | checkbox | edit | text | slider | frame | listbox | popupmenu).
- *Position*. Vector de cuatro elementos que indican la posición y tamaño del control [left, bottom, width, height]. Hay que advertir que el origen está en la esquina inferior izquierda. Las unidades se expresan mediante la propiedad Units.
- *Extent*. Vector de cuatro elementos que indica el tamaño del String de un objeto o elemento (etiqueta o texto mostrado).
- *Units*. Unidades en que se miden las dimensiones: “normalizad” miden desde (0,0) a (1.0,1.0). También pixels, inches, centimeters, y points (1/72 de una pulgada), que son unidades absolutas. Si el contenido es texto hay que especificar que es “characters”.
- *BackgroundColor*. Paleta de colores. El color escogido sirve para el fondo de un objeto.
- *ForegroundColor*. Paleta de colores donde el color escogido es para el texto de un objeto.
- *Enable*. Si el control está activo o no, es decir, si el usuario puede o no actuar sobre dicho control.
- *Visible*. Si la figura o el control es visible o no.

- *FontName*. El tipo de letra que se desea utilizar: 'Times New Roman', 'Arial', 'Courier New',...
- *FontSize*. El tamaño de la letra en puntos (points).
- *FontWeight*. Como se quiere el texto del objeto, que resalte más (negrita),...Las opciones que hay son las siguientes: 'normal', 'light', 'demi' y 'bold'.
- *Value*. Valor asociado con algunos controles: valor de la propiedad max cuando están en “on” y min cuando están en “off” en los checkboxes y radiobuttons; número ordinal (empezando por 1) del elemento seleccionado en las listbox y popupmenu.

Para obtener la etiqueta de cada elemento de la paleta de componentes (o elementos de interfaz de usuario o controles) se ejecuta: *File >> Preferences* y se selecciona *Show names in component palette*. Y lo que se obtiene es la Figura 3.12.

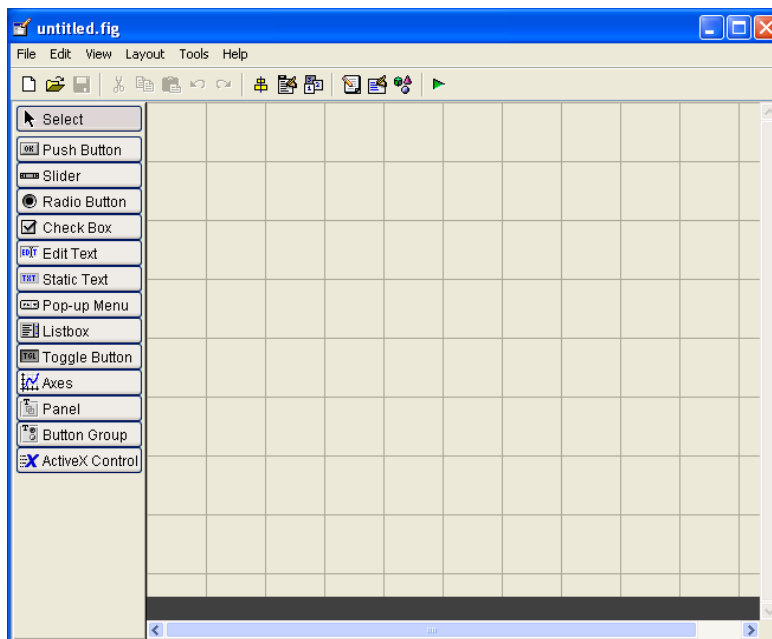


Figura 3.12. Entorno de diseño: componentes etiquetados.

Para crear uno de estos controles basta hacer clic sobre el icono correspondiente y luego ir a la figura en que se desee introducirlo, volver a hacer clic y arrastrar con el botón izquierdo del ratón pulsado para dar al control la posición y tamaño deseado. El nuevo control puede desplazarse y cambiarse de tamaño con ayuda del ratón, al igual que la propia ventana en la que ha sido situado.



4. DEFINICIONES

Este apartado trata de aclarar términos utilizados muy comúnmente en este proyecto, referentes al programa y que no se han definido anteriormente.

4.1. Handles

Cada uno de los objetos de MATLAB tiene un identificador único también llamado handle. Algunos gráficos tienen muchos objetos, en cuyo caso tienen múltiples handles.

El objeto raíz (pantalla) es siempre único y su identificador es el cero. El identificador de las ventanas es un entero, que aparece en la barra de nombre de dicha ventana. Los identificadores de otros elementos gráficos son números float. Todos estos números pueden ser obtenidos como valor de retorno y almacenados en variables de MATLAB para su posterior utilización.

MATLAB puede tener varias ventanas abiertas, pero sólo una es la ventana activa. A su vez una ventana puede tener varios ejes (axes), pero sólo algunos son los ejes activos.

MATLAB dibuja en los ejes activos de la ventana activa. Los identificadores de la ventana activa, de los ejes activos y del objeto activo se pueden obtener respectivamente con los comandos `gcf` (get current figure), `gca` (get current axes) y `gco` (get current object).

4.2. Callback

Es la acción a efectuar por MATLAB al actuar sobre el control. Se trata de una expresión u orden, almacenada en una cadena de caracteres o en una función, que se ejecutará al activar el control. Esta instrucción es equivalente a ejecutar la función o a realizar “eval” (expresión). Algunos controles tienen distintos tipos de callback según la acción que procese el usuario.

Existe una definición de objeto que se genera al crear los objetos mediante el módulo de GUIDE, si queremos definir un Callback de este objeto bastaría con introducir el código que se desea ejecutar, otro modo de ejecutarlo es llamar a otra función que realice las operaciones programadas. Siempre que la acción que se vaya a realizar sea compleja será mejor ejecutarlo mediante este segundo método porque, en primer lugar, es más rápido ejecutar una función que se mantendrá en memoria al compilarla que interpretar los caracteres cada vez que se ejecute y, en segundo lugar, las funciones mantienen su propio espacio de trabajo base por lo que no hay posibilidad de interferir con otros nombres de variables externos.



4.3. Funciones

Las funciones se definen dentro de cada fichero ejecutable de MATLAB, estos ficheros tienen la extensión “.m” y se explican más adelante.

La primera línea de un fichero que define una función tiene la forma:

`function` [lista de valores de retorno] = name(lista de argumentos)

donde name es el nombre del fichero.

Entre corchetes y separados por comas figuran los valores de retorno (siempre que haya más de uno), y entre paréntesis también separados por comas los argumentos. Puede haber funciones sin valor de retorno y también sin argumentos.

Los argumentos son los datos de la función y los valores de retorno sus resultados. Si no hay valores de retorno se omiten los corchetes y el signo igual (=); si sólo hay un valor de retorno no hace falta poner corchetes. Tampoco hace falta poner paréntesis si no hay argumentos.

Las variables definidas dentro de una función son variables locales, esto significa que son inaccesibles desde otras partes del programa y que no interfieren con variables del mismo nombre definidas en otras funciones o partes del programa. Esto es, pertenecen al propio espacio de trabajo de la función y no son vistas desde otros espacios de trabajo. Para que la función tenga acceso a variables que no han sido pasadas como argumentos es necesario definir dichas variables como variables globales, tanto en el programa principal como en las distintas funciones que deben acceder a su valor.

En cualquier función existen dos variables definidas de modo automático, llamadas nargin y nargs, que representan respectivamente el número de argumentos y el número de valores de retorno con los que la función ha sido llamada. Dentro de la función, estas variables pueden ser utilizadas como el programador desee.

MATLAB dispone de otra forma de pasar a una función un número variable de argumentos por medio de la variable varargin, que es un vector de celdas o “cell array” (es un vector cuyos elementos son cada uno de ellos una variable de tipo cualquiera) que contienen tantos elementos como sean necesarios para poder recoger en dichos elementos todos los argumentos que se hayan pasado en la llamada. No es necesario que varargin sea el único argumento, pero si debe ser el último, pues recoge todos los argumentos a partir de una determinada posición.



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

De forma análoga, una función puede tener un número indeterminado de valores de retorno utilizando `varargout`, que es también un “cell array” que agrupa los últimos valores de retorno de la función. Puede haber otros valores de retorno, pero `varargout` debe ser el último. El “cell array” `varargout` se debe crear dentro de la función y hay que dar valor a sus elementos antes de salir de la función.

La ejecución de una función termina cuando se llega a su última sentencia ejecutable.



5. ESTRUCTURA DE FICHEROS

En primer lugar, hay que destacar que esta aplicación está construida por diferentes subprogramas definidos en diferentes ficheros, cada uno de ellos es un programa que puede funcionar por sí solo si se le proporciona los datos y variables de entrada necesarios antes de ejecutarlos. La unión de estos subprogramas crea la aplicación final llamada “**ADEVI3.1**” (Análisis DE Vibraciones). En este proyecto se ha ampliado “**ADEVI2.0**” mediante la creación de nuevos subprogramas y la mejora de los existentes.

Estos subprogramas podrán estar formados por dos ficheros asociados o por uno. Siempre van a constar de un fichero con extensión “.m” y en el caso de que sean ventanas gráficas en sí mismas también necesitarán un fichero con extensión “.fig” asociado.

5.1. Ficheros “.m”

Son ficheros de texto sin formato (ficheros ASCII) que constituyen el núcleo de la programación en MATLAB. Estos ficheros se crean y modifican con un editor de textos cualquiera.

Al teclear su nombre y pulsar “Intro” se ejecutan uno tras otro los comandos contenidos en el fichero. Un fichero “.m” puede llamar a otros ficheros “.m”, e incluso puede llamarse a sí mismo de forma recursiva.

Estos ficheros contienen conjuntos de comandos o definición de funciones. Los ficheros de comandos se pueden llamar también desde funciones, como sucede en la mayoría de los subprogramas creados en esta aplicación. En este caso, las variables que se crean pertenecen a espacio de trabajo de la función. El espacio de trabajo de una función es independiente del espacio de trabajo base de MATLAB y del espacio de trabajo de las demás funciones. Esto implica que no habrá colisiones entre nombres de variables, si las variables creadas son necesarias dentro de otro programa habrá que volver a cargarlas al no pertenecer al mismo espacio de trabajo.

En este proyecto se incluyen en los ficheros “.m” todas las rutinas de cálculo y de definición de variables, matrices,... Se suelen complementar con comentarios a modo de aclaración para hacer el código más comprensible ante posibles modificaciones, estos comentarios se realizan dentro del mismo código en líneas que van precedidas del símbolo “%”, lo que es suficiente para que no se ejecute esa línea.



Los subprogramas que se utilizan en la aplicación descrita se caracterizan por ejecutar programas independientes entre sí pero cuyas variables interactúan, es decir, cada subprograma realizará una acción diferente, a su vez llamará a otro subprograma para la siguiente acción y utilizará, en casi todos los casos, variables y resultados obtenidos en subprogramas anteriores obteniendo otros que más adelante serán utilizados.

5.2. Ficheros “.fig”

El fichero “.fig” es el que guarda la configuración de la ventana de cada subprograma, esto es, todas las propiedades asociadas con la ventana que van a aparecer al ejecutarse (color, tamaño, botones...).

Todas estas propiedades se programan fácilmente a través del “Property Inspector” que se encuentra dentro de la utilidad GUIDE de MATLAB y que permite de manera intuitiva y en tiempo real cambiar propiedades gráficas, de posición e incluso de acciones realizadas en alguno de los elementos gráficos programados.

De modo más concreto, en el módulo GUIDE se programa una ventana con una serie de controles como pueden ser botones, combo box, cuadro de texto editables, gráficas, ejes y demás elementos que pueden aparecer dentro de cada una de las ventanas programadas, y esta información se visualiza gracias a los ficheros “.fig”

Las acciones o Callback de cada elemento de la ventana se reflejan también en el fichero “.m” por lo tanto un archivo “.fig” no realiza acciones por sí solo.

5.3. Diagramas

Una vez explicado cómo funciona el programa MATLAB 7.0., se expondrá la descripción estructural del programa que ocupa este proyecto. La aplicación ADEVI3.1 consta de treinta archivos “.m” y veinticuatro archivos “.fig” que poseen distintas funciones:

- Captura de datos
- Análisis de datos
- Visualización de los resultados numéricos
- Visualización gráfica de resultados
- Edición de gráficos



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

La descripción estructural de la aplicación ADEVI3.1 consiste en diagramas (representación visual de la aplicación siguiendo el orden de ejecución según las acciones realizadas).

En el “Capítulo I: INTRODUCCIÓN” se explicó que parte del proyecto consistía en hacer una aplicación informática, ADEVI3.1, en castellano y otra en inglés. Por lo que se mostrarán los diagramas de las dos versiones.

5.3.1. Diagrama para la versión en castellano

Figuras 3.13. a, b, c, d, e y f.

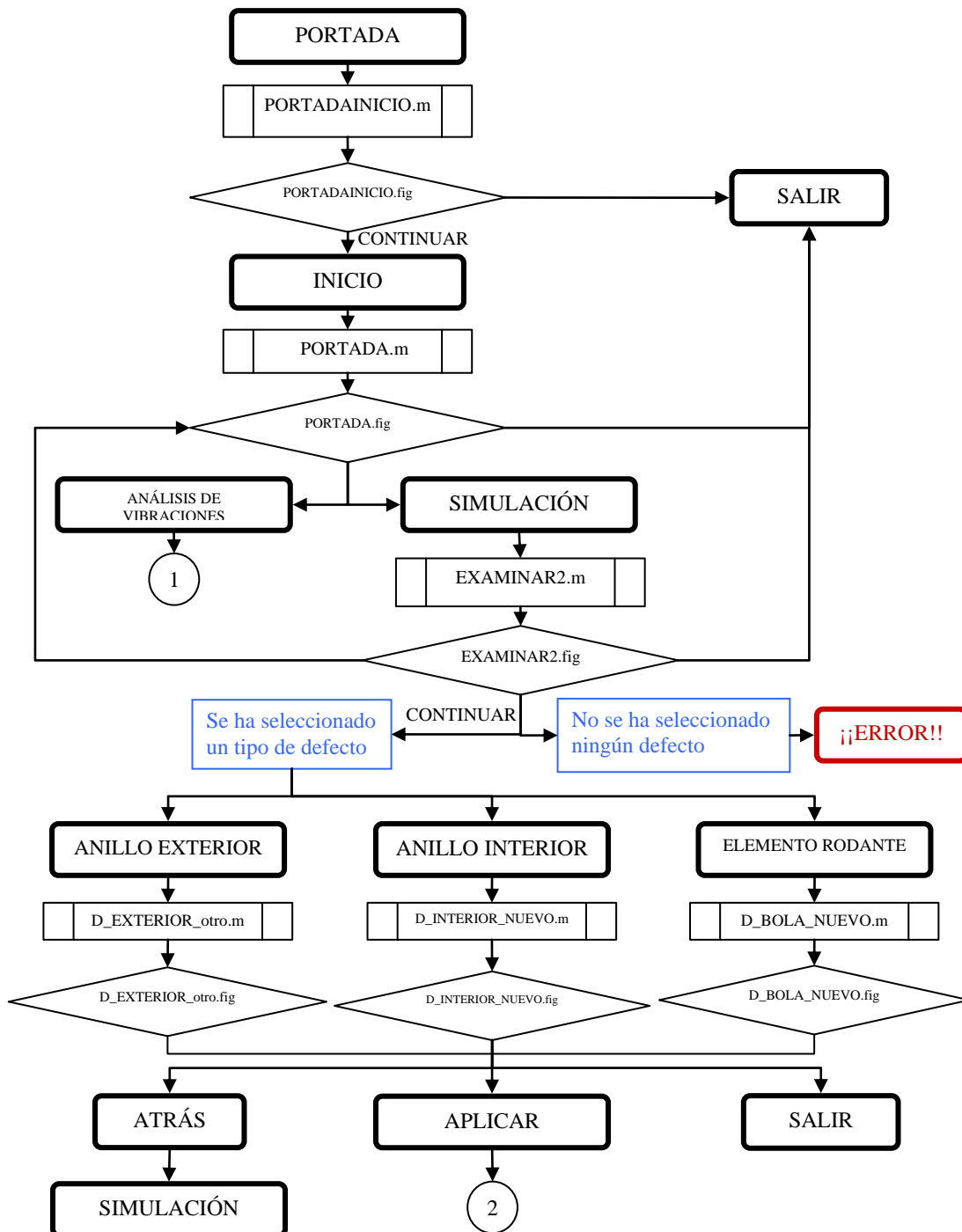


Figura 3.13.a. Diagrama de simulación de defectos en rodamientos.

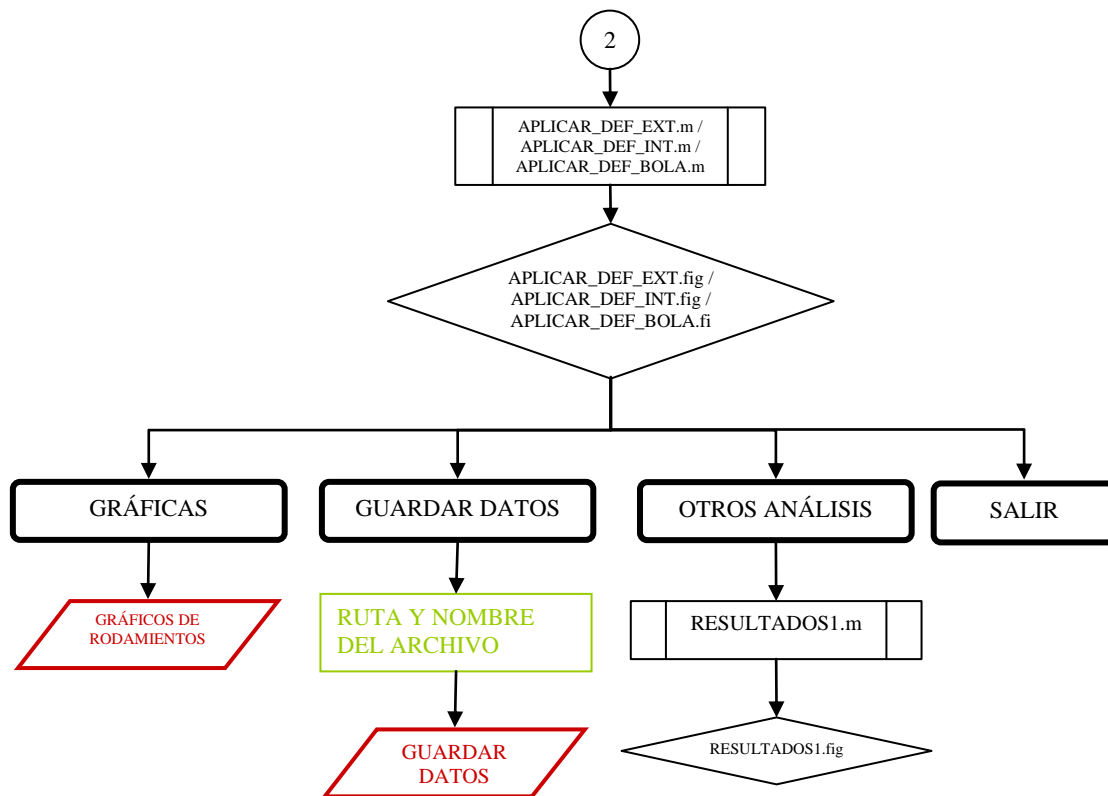


Figura 3.13.b. Diagrama de la pantalla de aplicar.

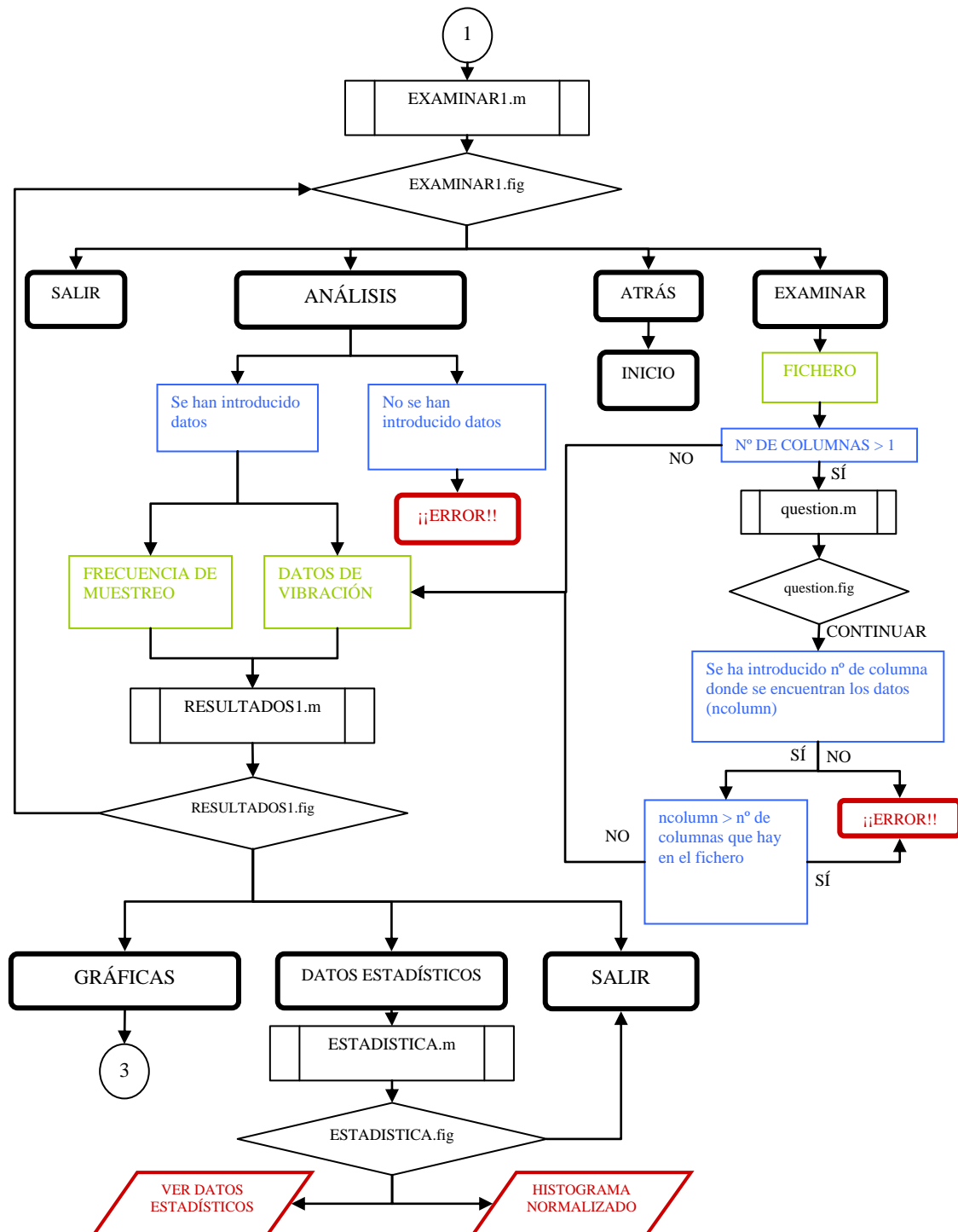


Figura 3.13.c. Diagrama de análisis de vibraciones.

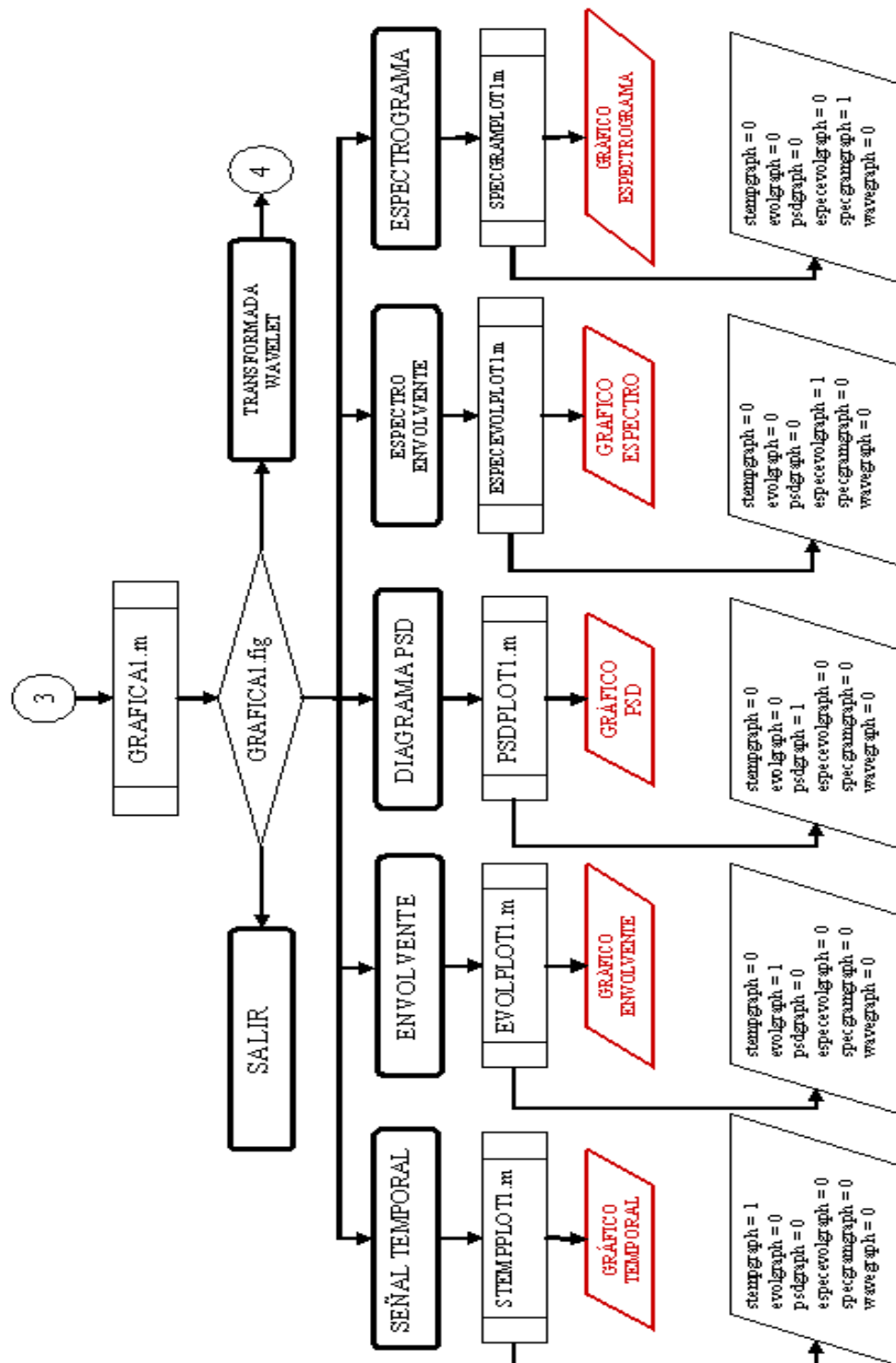


Figura 3.13.d. Diagrama de la pantalla de gráficas.

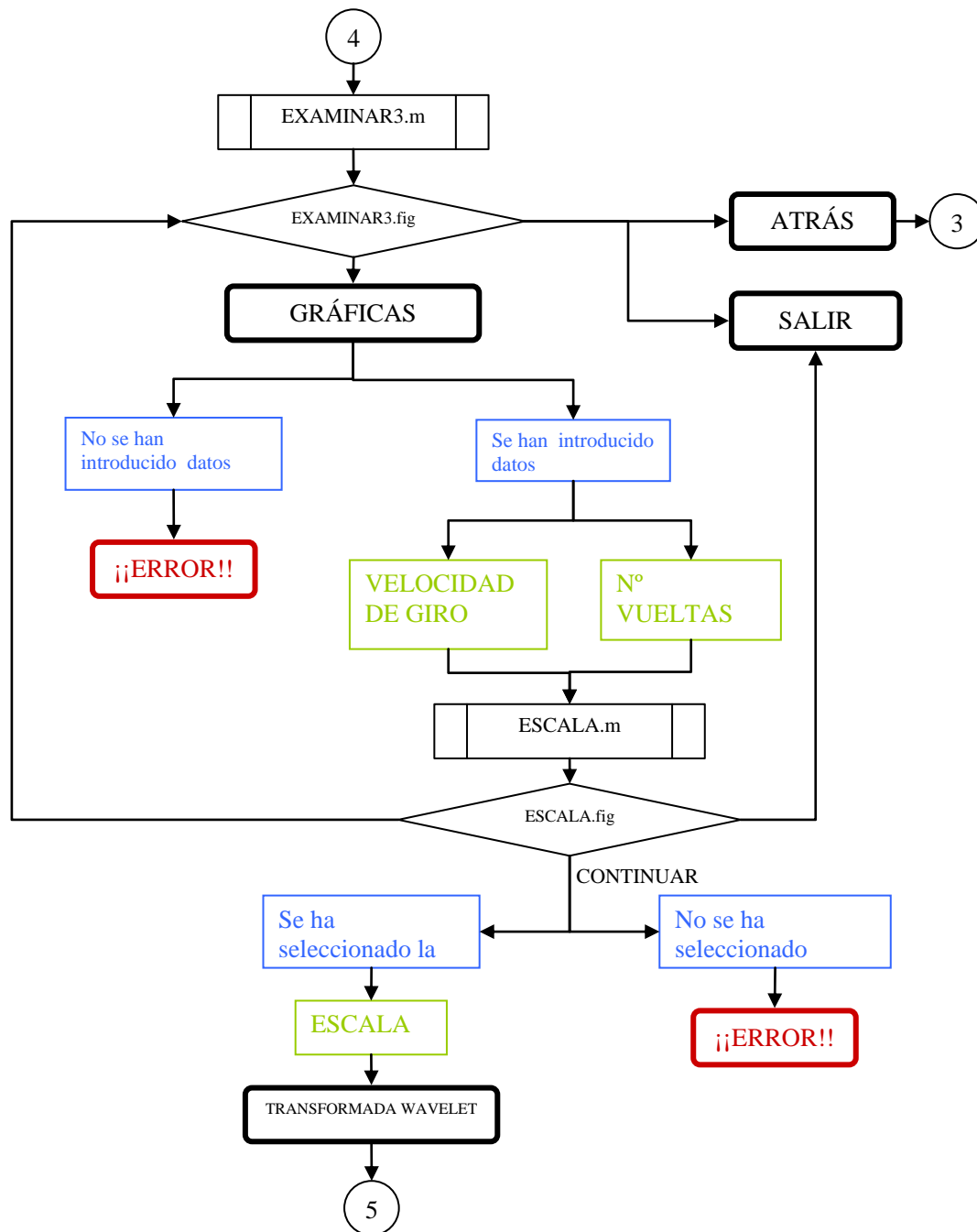


Figura 3.13.e. Diagrama de la pantalla Transformada Wavelet.

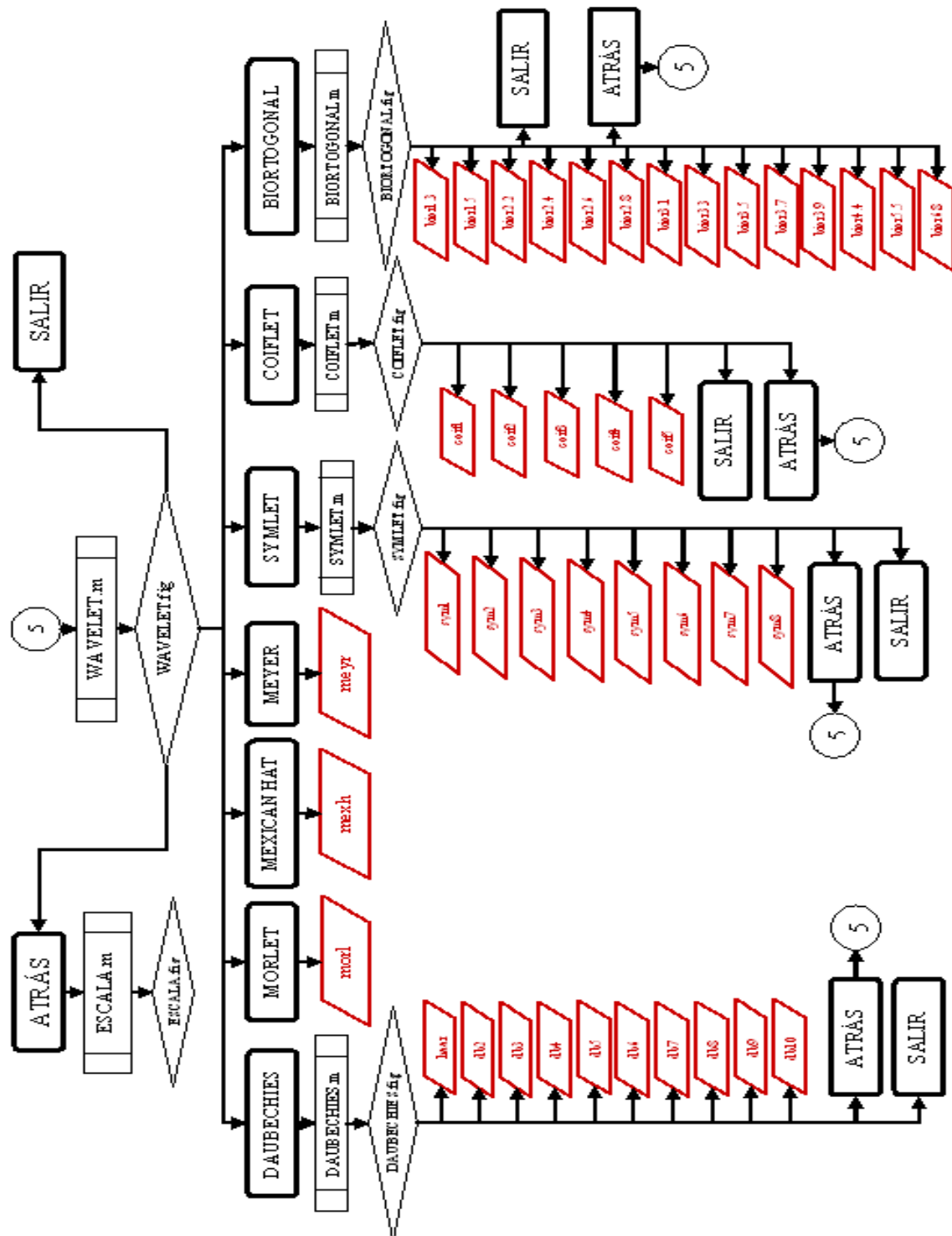
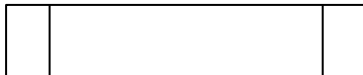


Figura 3.13.f. Diagrama de la pantalla de gráficas de la Transformada Wavelet.

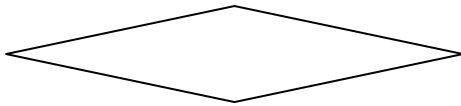
A continuación se explica el significado de cada símbolo de los diagramas de flujo:



Título del programa y las opciones.



Ficheros “.m” de MATLAB.



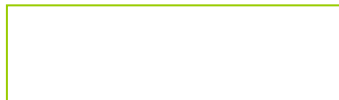
Ficheros “.fig” de MATLAB.



Opciones que se dan dentro del mismo programa.



Resultado da ¡¡ERROR!!



Información o datos que se introducen en el programa.



Resultados numéricos o gráficos.



5.3.2. Diagramas de la versión en inglés

A continuación se mostrará los diagramas de la versión inglesa, pues se han modificado los nombres de los archivos. Figuras 3.14. a, b, c, d, e y f.

Los símbolos de cada diagrama tienen el mismo significado que en la versión castellana.

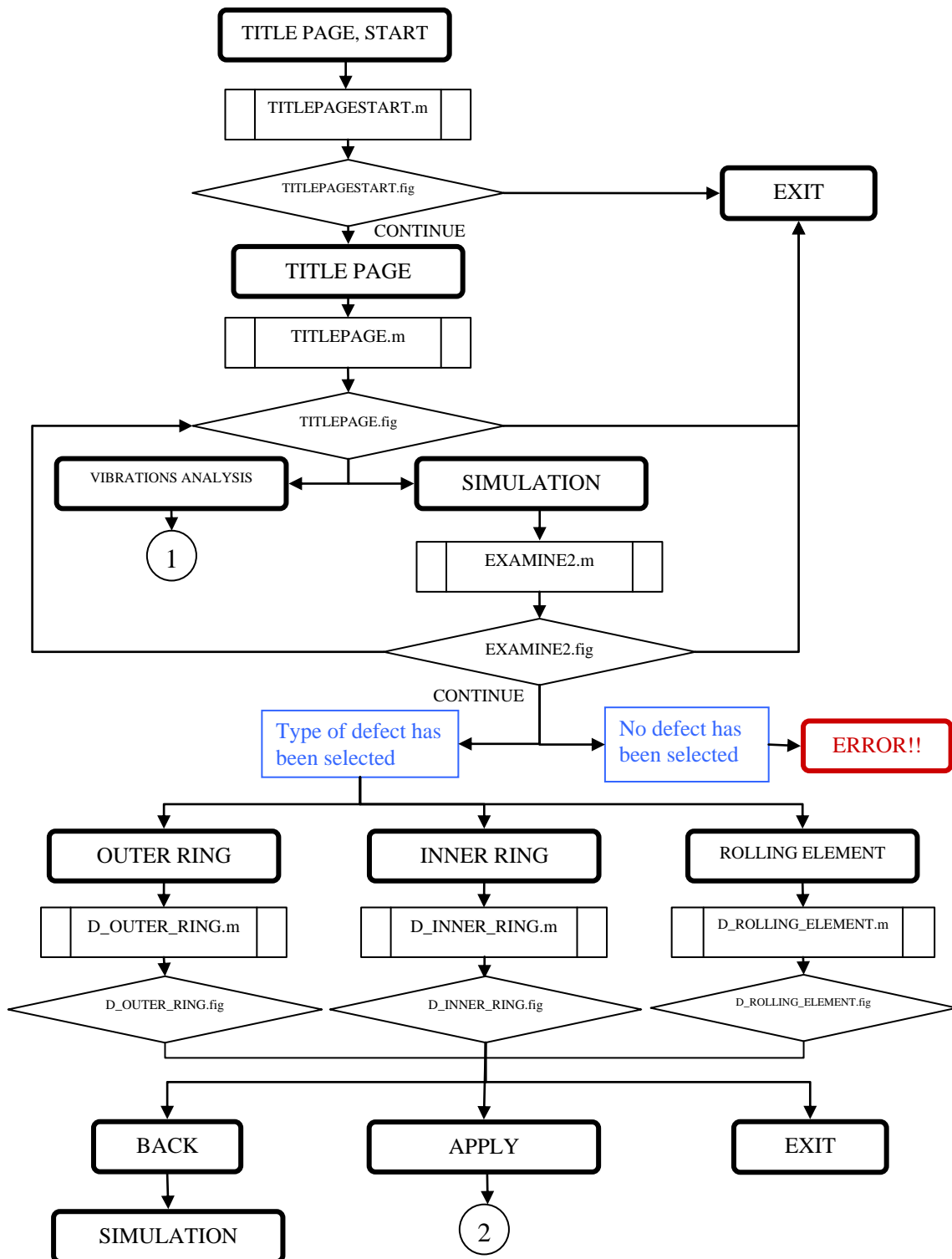


Figura 3.14.a. Diagrama de la simulación de defectos en rodamientos. (Inglés).

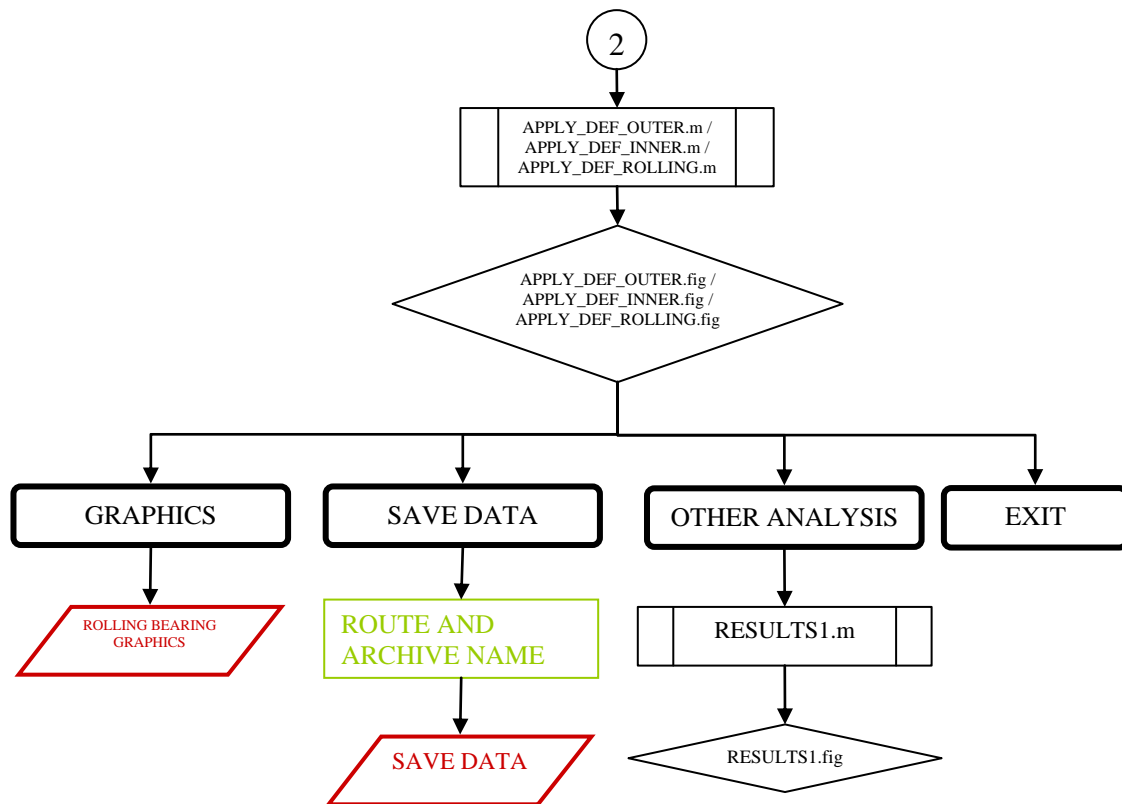


Figura 3.14.b. Diagrama de la pantalla de aplicar. (Inglés).

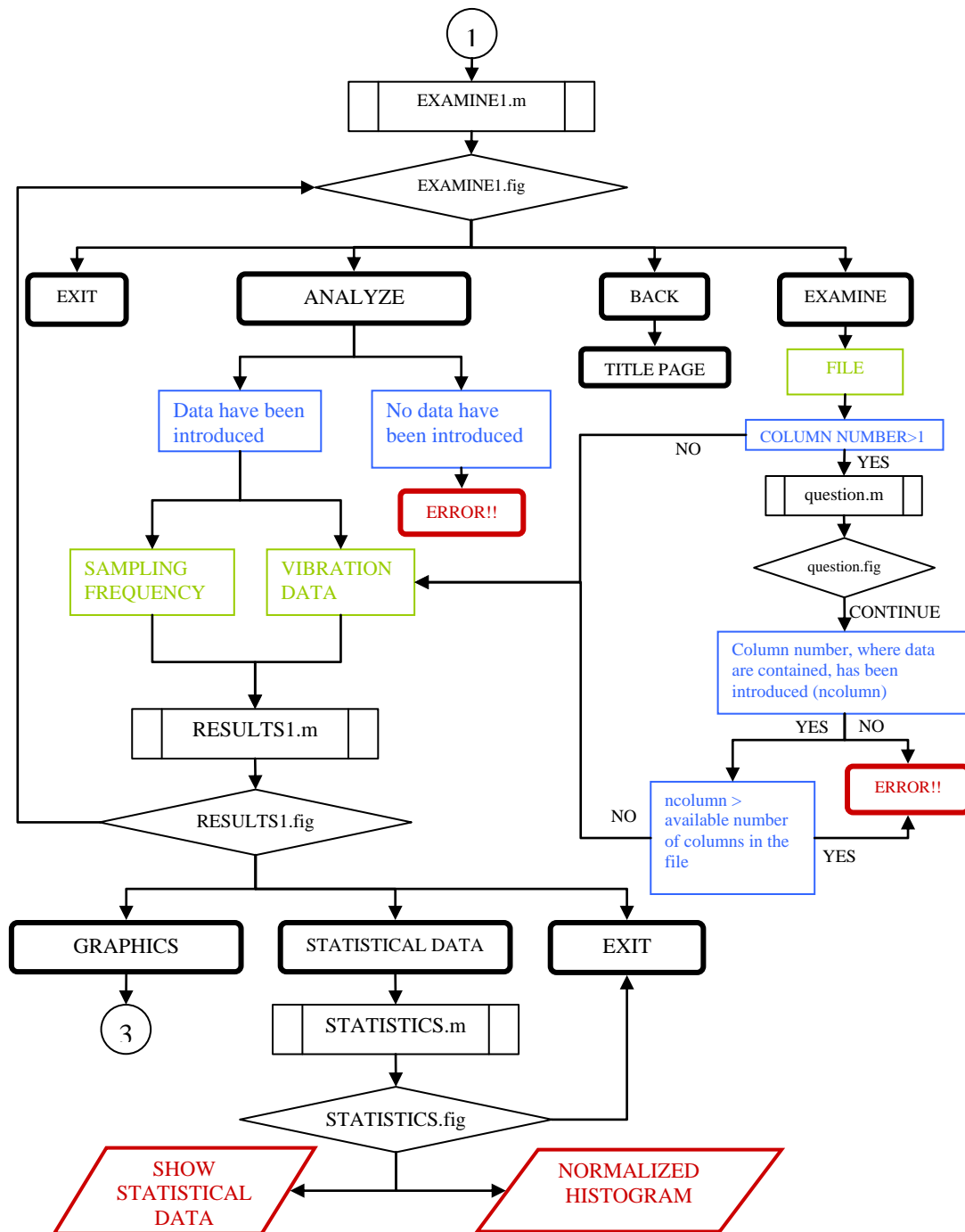


Figura 3.14.c. Diagrama del análisis de vibraciones. (Inglés).

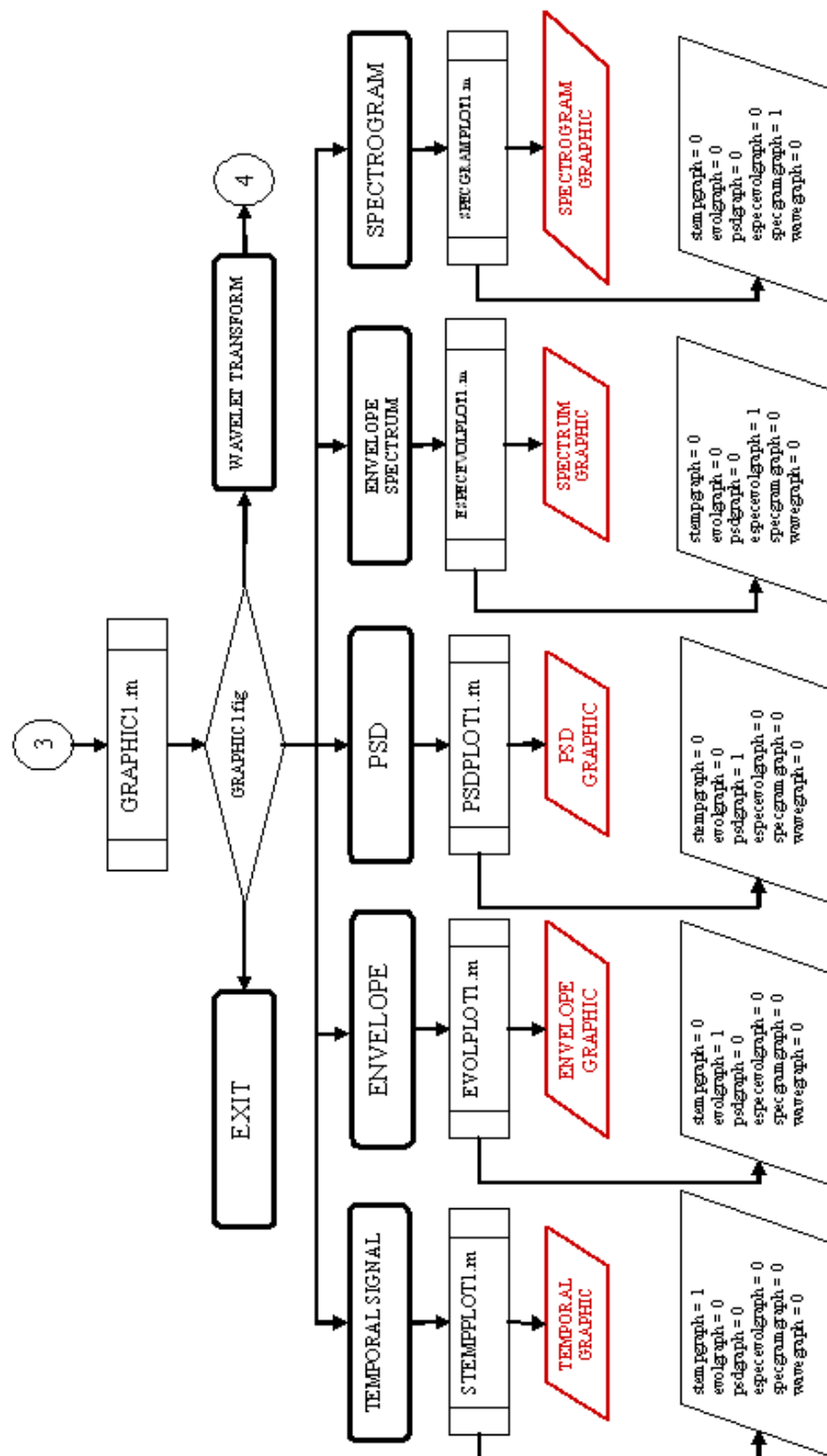


Figura 3.14.d. Diagrama de la pantalla de gráficas. (Inglés).

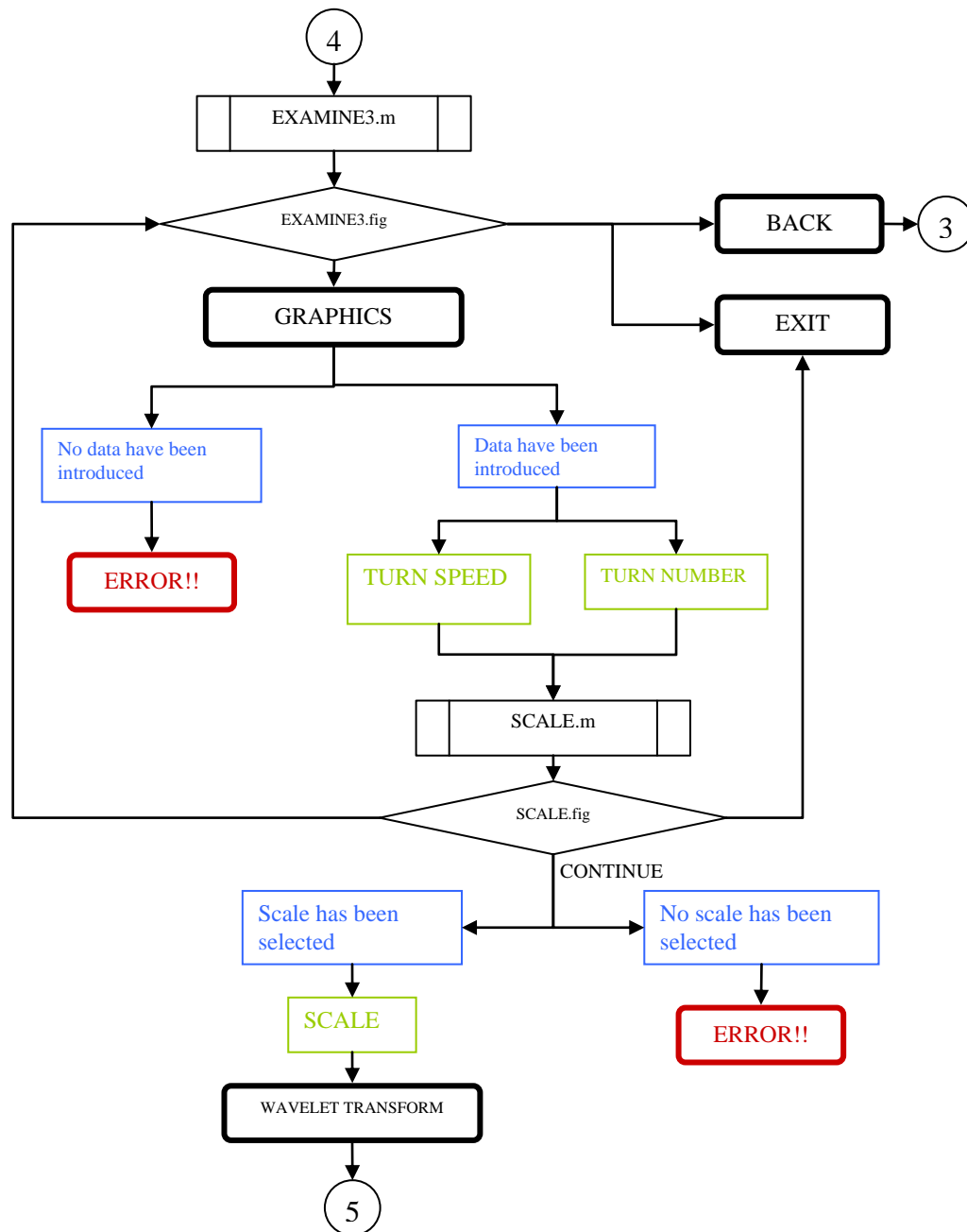


Figura 3.14.e. Diagrama de la pantalla de la Transformada Wavelet. (Inglés).

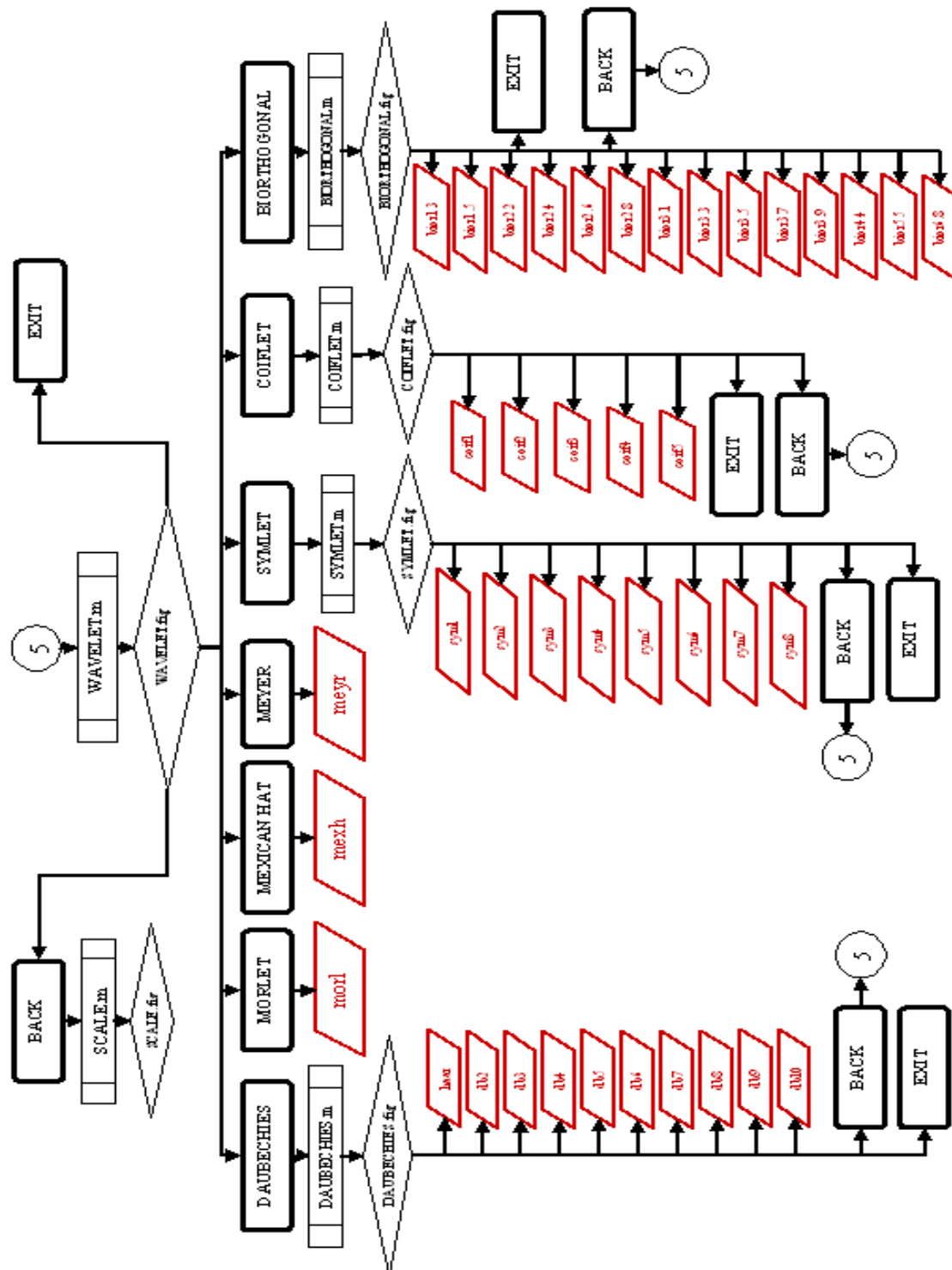


Figura 3.14.f. Diagrama de la pantalla de gráficas de la Transformada Wavelet. (Inglés).



6. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

En este apartado se explican los programas utilizados para realizar **ADEVI3.1**. Para ello, se irán describiendo cada uno de los subprogramas de los que consta esta aplicación, en cuanto a funciones, variables y programación utilizada.

Hay que recordar que cuando se generan programas a partir del módulo GUIDE de MATLAB se genera automáticamente un fichero “.m” con el mismo nombre que el “.fig” que estamos creando, en él se recogen las funciones de los controles que hemos definido a través del GUIDE y genera de forma automática las primeras líneas del código en las que se fijan, por un lado la función principal que será el programa, seguido de una serie de comentarios con la fecha de la última modificación del programa a través de GUIDE y una línea en la que explica que el programa corresponde al fichero “.m” de la aplicación “.fig” creada.

También genera una serie de comandos para recoger los handles de las funciones y otras definiciones requeridas y, también, hace uso de las sentencias “try”...”catch”...”end” que permiten gestionar los errores que se pueden producir en tiempo de ejecución.

Por último, introduce unos comentarios de la forma de trabajo de MATLAB con los callback.

La forma general de presentación de estas primeras líneas es la siguiente, se pone como ejemplo, el programa “PORTADAINICIO.m”

```
function varargout = PORTADAINICIO(varargin)
% PORTADAINICIO M-file for PORTADAINICIO.fig
%   PORTADAINICIO, by itself, creates a new PORTADAINICIO or raises the existing
% singleton*.
%
%   H = PORTADAINICIO returns the handle to a new PORTADAINICIO or the handle to the
% existing singleton*.
%
%   PORTADAINICIO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in PORTADAINICIO.M with the given input arguments.
%
%   PORTADAINICIO('Property','Value',...) creates a new PORTADAINICIO or raises the
% existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are applied to the GUI before
% PORTADAINICIO_OpeningFunction gets called. An unrecognized property name or invalid
% value makes property application stop. All inputs are passed to
% PORTADAINICIO_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%  
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES  
  
% Copyright 2002-2003 The MathWorks, Inc.  
  
% Edit the above text to modify the response to help PORTADAINICIO  
  
% Last Modified by GUIDE v2.5 02-Jun-2005 13:36:29  
  
% Begin initialization code - DO NOT EDIT  
gui_Singleton = 1;  
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...  
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...  
                  'gui_OpeningFcn', @PORTADAINICIO_OpeningFcn, ...  
                  'gui_OutputFcn',  @PORTADAINICIO_OutputFcn, ...  
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...  
                  'gui_Callback',    []);  
if nargin && ischar(varargin{1})  
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});  
end  
  
if nargout  
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});  
else  
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});  
end  
% End initialization code - DO NOT EDIT
```



6.1. ADEVI3.1 en castellano

A continuación se pasa a describir uno a uno todos los programas de los que consta la aplicación.

6.1.1. Portada

Para comenzar a utilizar la aplicación ADEVI3.1 es necesario teclear por pantalla en la ventana de **Command Window** el comando “PORTADAINICIO” (es mejor en mayúsculas, porque en minúsculas lo abre aunque avisa del error) después del prompt característico (>>) o también la otra manera para acceder a él es en la ventana Current Directory buscar el archivo “PORTADAINICIO.m” y hacer doble clic en él, y para ejecutar el programa: Debug >> Run. Este comando llama al primer subprograma de la aplicación que se presenta a modo de una ventana que da la bienvenida al programa y ofrece la opción de continuar o salir. Este primer subprograma consta de un fichero PORTADAINICIO.m y un fichero gráfico asociado llamado PORTADAINICIO.fig.

Las líneas que se ven en color verde en el código de MATLAB siempre están precedidas del símbolo “%”. Se refieren a comentarios aclaratorios de la instrucción codificada.

Lo primero que hace el programa es listar las funciones en el orden en que han sido creadas. Para MATLAB cada botón programado es una función diferente por lo que hay que declararla como tal, cuando se crea un botón desde el GUIDE de forma automática escribe en el fichero “.m” la siguiente línea:

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

La declaración de una variable será siempre de color azul.

MATLAB ofrece un código automático para cada tipo de funciones declaradas, en este caso se está declarando un botón cuyo nombre por defecto o “tag” será pushbutton1 al ser el primero declarado.

Las siguientes líneas de código que se programen inmediatamente después de la declaración de la función son las acciones que se van a realizar al operar sobre esta función, en este caso al pulsar el botón, son los denominados callback.

Cada función puede llevar asociada tantas acciones como se quiera siempre que sean congruentes con la programación de MATLAB.



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

Si consta de una sola acción no es necesario elaborar otro programa para realizar la acción de cerrar la ventana y se programa directamente dentro del mismo subprograma. Más adelante se verán casos en el que las acciones tomadas al actuar sobre algún control son más complejas y en esos casos se confeccionará un subprograma que realice las acciones y al cual se le llamará desde la definición del control. Estas órdenes se programan modificando directamente sobre el código del fichero “.m”.

La programación de esta primera ventana consta de pocas acciones. Hay que destacar que la programación de las acciones de cada uno de los elementos de la ventana se programa por separado aunque pueden interactuar con el resto de elementos. Esto es de fácil comprensión en esta primera ventana en la cual, si se elige continuar, se pasa a la ventana de inicio de la aplicación propiamente dicho, y si se elige salir se saldrá de la aplicación. Para explicar esto hay que entrar en la rutina propia del programa:

```
%-----  
%EJES DE COORDENADAS CON UN EJEMPLO DE VIBRACION  
%-----  
function varargout = PORTADAINICIO_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
varargout{1} = handles.output;  
F=50;  
At=0.01;  
N=1000;  
for i=1:N;  
    signal(i)=2*i^(4/3)*sin(F*2*pi*i*At);  
end;  
plot(signal)  
  
%-----  
%BOTON "CONTINUAR" ENTRA EN LA APLICACION ADEVI2.0  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
PORTADA  
close(PORTADAINICIO)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
close(PORTADAINICIO)
```



El programa, tal y como se ve, se puede dividir en tres partes.

La primera en la que se han introducido unos ejes de coordenadas a modo de ejemplo de vibraciones. Aunque no tiene significado práctico, también es necesario programarlos. Lo que se ha hecho es un bucle de una fórmula que calculará el programa donde se ha especificado el valor de cada variable y una vez realizado el cálculo muestra la imagen de la fórmula en pantalla.

La segunda es el botón “CONTINUAR”. Lo que hace esta función es llamar a otro subprograma que dará lugar a otra nueva ventana y una vez abierta esta ventana se cerrará la actual.

La tercera es el botón “SALIR”. Consta de una línea y lo que hace es cerrar la ventana activa llamada “PORTADAINICIO”.

6.1.2. Inicio

Esta es realmente la primera pantalla de la aplicación. En ella se nos da a elegir entre las dos modalidades posibles, el “análisis de ficheros de datos de vibraciones” y la “simulación de vibraciones en rodamientos”.

El subprograma se llama “PORTADA.m”. La pantalla consta de un botón de salir programado exactamente igual que en el caso anterior. Todos estos botones se programan de la misma manera. Aparte existen dos botones que permiten elegir entre las dos modalidades del programa. Su código es sencillo, se ha visto anteriormente con el botón “CONTINUAR” pues sólo son un puente para entrar en la ventana correspondiente, mientras se cierra la ventana actual. Se expresa a continuación el código del programa:

```
%-----  
%BOTON "ANALISIS DE FICHEROS DE DATOS DE VIBRACIONES" PERMITE ACCEDER A  
%ESTA OPCION DE ANALISIS  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
EXAMINAR1  
close(PORTADA)  
  
%-----  
%BOTON "SIMULACION DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS" PERMITE ACCEDER A  
%ESTA OPCION DE SIMULACION  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
EXAMINAR2  
close(PORTADA)
```



```
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA PANTALLA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
close(PORTADA)
```

6.1.3. Análisis de vibraciones

La pantalla descrita a continuación es la que aparece al pulsar el botón de “ANÁLISIS DE FICHEROS DE DATOS DE VIBRACIONES” en la pantalla de inicio, el subprograma que aparece se llama “EXAMINAR1.m” (que contiene también un fichero gráfico llamado “EXAMINAR1.fig”) y muestra una pantalla para introducir los datos necesarios para el análisis, por un lado, la ubicación del fichero a analizar y, por otro, la frecuencia del ensayo.

El programa codificado es:

```
%-----  
%"EDIT1" SE RELLENARA AUTOMATICAMENTE CON LA RUTA DEL FICHERO DE DATOS  
%QUE SE VAN A ANALIZAR  
%-----  
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% --- Executes during object creation, after setting all properties.  
function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%"EDIT2" SE RELLENARA MANUALMENTE CON LA FRECUENCIA DESEADA PARA EL  
%ANALISIS  
%-----  
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
frecuencia = str2double(get(handles.edit2,'string'));  
save frecuencia frecuencia -ascii  
  
% --- Executes during object creation, after setting all properties.  
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.  
% See ISPC and COMPUTER.  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
194
```

“Evolución de una aplicación informática para el análisis y simulación de vibraciones.
ADEVI3.1”

```
%-----  
%BOTON "EXAMINAR" PERMITE BUSCAR EL ARCHIVO CON LOS DATOS QUE SE  
%DESEAN CARGAR PARA EL ANALISIS DENTRO DEL DISCO C  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% para que funcione bien poner ruta donde se encuentre el ejecutable  
%dos c:\ADEVI3.1\ejecutables\executor.exe  
dos C:\ADEVI3.1\ejecutables\executor.exe  
  
file = 'c:\path.dat';  
fid = fopen(file);  
tline = fgetl(fid);  
fclose(fid)  
  
set(handles.edit1,'string',tline)  
  
archivo=load(tline);  
r=size(archivo);  
columna=r(2);  
save columna columna -ascii  
save tline tline  
  
if ( columna == 1 )  
    ncolumn=1;  
    vibracion=archivo(:,ncolumn);  
    n=length(vibracion);  
    save vibracion vibracion -ascii  
    save n n -ascii  
    save ncolumn ncolumn -ascii  
else  
    question  
end  
  
%-----  
%BOTON "ANALISIS" CARGA LOS DATOS INTRODUCIDOS MEDIANTE "EXAMINAR" Y  
%LOS PREPARA PARA EL POSTERIOR ANÁLISIS GRAFICO O ESTADISTICO  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% DISPARA ERROR SI NO ESTAN TODOS LOS CAMPOS RELLENOS  
  
tline1=str2double(get(handles.edit2,'string'));  
tline2=get(handles.edit1,'string');  
exist1 = isnan(tline1);  
exist2 = length(tline2);  
  
if ( exist2 == 0 | exist1 == 1 )  
    errordlg('RELLENE TODOS LOS CAMPOS PARA CONTINUAR.','¡¡ERROR!!')  
else  
    RESULTADOS1  
    close(EXAMINAR1)  
end
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "ATRAS" DEVUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR CERRANDO LA PANTALLA  
%ABIERTA  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
PORTADA  
close(EXAMINAR1)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA PANTALLA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
close(EXAMINAR1)
```

Cuadros de texto editables RUTA DEL FICHERO (“EDIT1”) y *FRECUENCIA DE MUESTREO* (“EDIT2”). En esta ventana aparecen controles que todavía no han sido utilizados, son los cuadros de texto editables que piden datos necesarios para el programa y que pueden ser rellenados por teclado o mediante funciones u otros subprogramas de la aplicación.

Al igual que en el caso de los botones, lo primero es determinar las funciones de los cuadros de texto editables. También tendrán un número asignado por MATLAB para distinguir entre los diferentes cuadros editables de la misma ventana, así este primer editable se ha denominado con la tag “edit1” y es el que recoge el fichero que se va a analizar, con su ruta o ubicación dentro del PC, de tal modo que el valor escrito en ese cuadro se pueda recoger en una variable que será utilizada más adelante. La información de este cuadro editable se escribirá automáticamente, está programado para que así sea.

El segundo cuadro de texto editable es “edit2”, por haberse creado en segundo lugar, y es el cuadro en el que se introduce la frecuencia en Hz, este valor también se recoge más adelante en una variable para ser utilizado en los cálculos.

En el caso del cuadro de texto editable en el que se introduce la frecuencia (edit2) se define la variable “frecuencia” con el valor introducido en el cuadro de texto, esto es posible mediante la función “get”, que en este caso se utiliza para recoger la propiedad “string” del cuadro de texto editable. Es necesario guardar la variable para poder utilizarla más adelante ya que se ha creado dentro de una función y por tanto si no se archiva sólo se puede utilizar en el espacio de trabajo de esta función. El formato para guardar variables numéricas es el utilizado en la sentencia anterior, se utiliza la función “save” a continuación el nombre de la variable a guardar y seguidamente el nombre que se le quiere dar a la variable para después cargarla en otra aplicación. En esta aplicación, se ha tomado el criterio de llamarlas del mismo modo para evitar confusiones. El modificador “-ascii” para las variables numéricas permite que no existan problemas a la hora de cargar las variables en el código de cualquier otro fichero “.m” (hay que recordar que los ficheros “.m” son ficheros ASCII).



Al igual que en el resto de controles, estas líneas se generan automáticamente en el fichero “EXAMINAR1.m” al crear los cuadros de texto editables mediante el módulo de GUIDE.

Botón “EXAMINAR”. El siguiente botón, denominado “EXAMINAR”, se define igual que en el resto de los casos, su etiqueta o tag es pushbutton1. Este botón es el que nos permite explorar y buscar el archivo de datos del ensayo. Se utilizará siempre para rellenar el nombre del fichero de datos ya que si se introduce este dato por teclado puede dar pie a un error de escritura del fichero o puede ser que no exista el fichero escrito, de este modo se asegura que se incorpora el fichero correcto. Para realizar esta acción es necesario ejecutar un programa externo a MATLAB, este programa se llama “executor.exe” y es un ejecutable creado mediante la aplicación Visual Basic, permite acceder a la ventana estándar del Explorador de Windows para buscar el archivo necesario y abrirlo. Simultáneamente, graba la ruta del archivo seleccionado en un fichero llamado path.dat (en el disco C:\) que será necesario más adelante. La información de la ruta del fichero y el contenido del fichero se guarda en el archivo llamado tline. Al abrir este archivo el programa estudia si tiene una columna o más, si tiene una, ésta es la que contiene los datos de vibración que se llamará la variable vibración. Si, en cambio, tiene más de una columna el archivo, éste programa remite a otro subprograma para que se especifique entonces cuál es la columna que contiene los datos de vibración.

Se acaba de resumir la función que realiza el botón “EXAMINAR” para tener una idea, pero a continuación se desarrollará más detenidamente:

En primer lugar se ejecuta el programa de Visual Basic executor.exe, para ello es necesario llamarlo con la función “dos” al ser un ejecutable externo, solo es necesario darle el nombre del fichero ejecutable con la ruta y ya se ejecuta:

```
dos C:\ADEVI3.1\ejecutables\executor.exe
```

Con esta aplicación de Visual Basic se genera un fichero llamado path.dat en el que se almacena la ruta del fichero que se ha seleccionado para analizar en la ventana de “Abrir” de Windows. Para almacenar en una variable esta ruta hay que leer desde MATLAB el fichero path.dat. Esto se realiza leyendo con formato mediante las funciones “fopen” y “fclose”:

```
file = 'c:\path.dat';  
fid = fopen(file);  
tline = fgetl(fid);  
fclose(fid)
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

Lo primero es definir una variable “file” que sea la ruta del fichero path.dat. En este caso “fid” es un valor de retorno que sirve como identificador del fichero y a continuación se abre el fichero con la función “fopen”.

Para recoger en una variable el valor de la ruta contenida en el fichero path.dat se define la variable “tline”. Mediante la función “fgetl” se consigue tomar la línea del fichero path.dat definido por el identificador fid, en este caso el fichero solo tiene una línea que será la ruta del fichero a analizar. Para cerrar este fichero se utiliza la función “fclose” y el identificador del fichero que se denominó “fid”. Para que en la ventana de “EXAMINAR1.fig” se refleje la ruta del fichero a analizar es necesario que se introduzca mediante la función “set” el valor de la variable “tline” como string del cuadro de texto editable, esto se programa dentro de este botón ya que con anterioridad a él no existe esta variable. Por último, se guarda el valor de esta variable para utilizarlo más adelante, con el mismo nombre para que no existan confusiones.

A continuación dentro de esta función se lee el fichero de datos a analizar, en este caso se lee el archivo mediante otra función llamada “load” que permite una mayor flexibilidad.

Se hallan así las dimensiones del fichero, mediante la función “size” que recoge en la variable “r” el número de filas y columnas del fichero. Una vez que se define la variable “columna” que contiene el número de columnas del fichero de datos a analizar, se programan dos bucles para las diferentes acciones según exista sólo una columna o varias.

Si sólo existe una columna se define directamente la variable “ncolumn” con el valor de uno ya que esta variable va a indicar cuál es la columna que contiene los datos de vibración, seguidamente se calcula la variable “vibracion” que será un vector columna con los datos de vibración: todas las filas de la columna “ncolumn”, que en este caso es 1. La siguiente variable definida es “n” que es el número de datos tomados en el ensayo y coincide con el número de filas del vector “vibración”. Para finalizar se guardan las tres variables creadas.

En caso de existir más de una columna es necesario saber cuál es la que contiene los datos de vibración, para ello hay que interactuar con el usuario de la aplicación y preguntar cuál es la columna válida. Para conseguirlo se utiliza otro subprograma llamado “question.m” que tiene una ventana asociada, “question.fig”, y que se describe más adelante. De este otro subprograma se obtienen las mismas variables que en el caso de que sólo exista una columna, esto es las variables “vibracion” y “n”.

Botón “ANÁLISIS”. Una vez que se pulsa este botón, la función chequea si los cuadros de texto editables están rellenos, esto lo hace mediante las variables “exist1” y “exist2”. En el caso del cuadro de texto editable que contiene la ruta del fichero mediante la función `length`, define la variable “exist2” como la longitud de la cadena de caracteres existente en el cuadro de texto, en caso de que no tenga valor introducido la variable “exist2” será cero y se dispara una ventana de error que indica al usuario que rellene todos los campos, esta ventana se dispara con la función “`errordlg`” seguida del mensaje que se va a incluir en la ventana.

Para el valor de frecuencia de muestreo, al ser un valor numérico se aprovecha la función “`isnan`” que actúa de la siguiente manera; genera la variable “exist1” mediante la función “`isnan`”, esta función devuelve un valor igual a uno cuando el resultado numérico de la variable sobre la que actúa es “NaN”, esto significa que no tiene valor numérico o es indefinido (Not-a-Number). Por tanto se escribe el bucle de tal manera que si el valor numérico que hay en el cuadro de texto editable es indefinido genera una ventana de error que avisa al usuario para que rellene todos los datos, esta ventana de error es la misma que en el caso anterior.

En el mismo bucle si no se cumple ninguna de esas dos condiciones llama al siguiente subprograma llamado “`RESULTADOS1.m`” y se cierra la ventana activa.

Botón “ATRÁS”. Un primer botón nombrado “ATRÁS” que permite ir a la pantalla anterior, cerrando la pantalla activa, se programa de forma muy fácil. Mediante las dos órdenes programadas en este botón lo que hace es volver a llamar al subprograma “`PORTADA.m`” que se ha explicado anteriormente y cerrar la ventana activa.

Botón “SALIR”. El siguiente botón del que se compone esta pantalla es el llamado “SALIR” que permite terminar la aplicación, como en el resto de ventanas, se programa de forma idéntica a como sucedía en la pantalla anterior.

6.1.4. Question

Esta ventana se visualiza sólo en el caso de que el fichero de datos a analizar tenga más de una columna. En este caso, al seleccionar el fichero de datos que contiene la señal se genera una ventana en la que se avisa que el fichero tiene más de una columna de datos y pregunta cuál de las columnas posee los datos de la señal vibratoria del ensayo, esta ventana que se genera es la ventana “`question.fig`”, y consta solamente de un cuadro de texto editable y un botón. Contendrá un fichero “.m” asociado que se llama “`question.m`” que contiene los comandos a ejecutar.



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% -----  
% CUADRO DE TEXTO EN EL QUE SE INTRODUCE EL NUMERO DE LA COLUMNA QUE  
%CONTIENE LOS DATOS DE VIBRACION  
% -----  
function varargout = edit1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
  
ncolumn = str2double(get(handles.edit1,'string'));  
save ncolumn ncolumn -ascii  
  
% -----  
% BOTON "CONTINUAR" PARA SEGUIR CON LA APLICACION UNA VEZ INTRODUCIDO  
%EL DATO REQUERIDO  
% -----  
function varargout = pushbutton1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
  
dato = str2double(get(handles.edit1,'string'));  
exist3=isnan(dato);  
  
if ( exist3 == 1 )  
    errordlg('ESCRIBA EL NUMERO DE COLUMNA.','¡¡ERROR!!')  
else  
    load columna  
    ncolumn=dato;  
  
    if ( ncolumn > columna)  
        warndlg('EL NUMERO DE COLUMNA INDICADO NO EXISTE EN EL  
FICHERO.','¡¡ERROR!!')  
    else  
        load tline  
  
        archivo=load(tline);  
        vibracion=archivo(:,ncolumn);  
        n=length(vibracion);  
        save vibracion vibracion -ascii  
        save n n -ascii  
  
        close(question)  
    end  
end  
end
```

Cuadro de texto editable COLUMNA. Este cuadro de texto se rellena por teclado y lo que contiene es el número de la columna que almacena los datos de la señal vibratoria. Su programación es como en cualquier otro cuadro de texto editable. La finalidad de estas líneas de código es almacenar en la variable “ncolumn” el número de la columna que contiene los datos de vibración y almacenar este valor para utilizarlo en cualquier otro espacio de trabajo.

Botón “CONTINUAR”. Este botón llamado CONTINUAR se utiliza para seguir ejecutando el programa una vez que se haya introducido el dato necesario almacenado en ncolumn.

Comprueba que exista un dato introducido en el cuadro de texto editable. Para realizar esta comprobación se crea la variable “dato”, como el valor que se obtiene del cuadro de texto editable al utilizar la función “set”, después genera la variable “exist3” mediante la función de MATLAB “isnan”, esta función genera el valor uno cuando el resultado numérico de la variable sobre la que actúa es indefinido, en este caso activa una ventana de error que avisa al usuario para que se escriba el número de la columna.

Por otro lado, verifica que el número de columna introducido por el usuario es una de las columnas que contiene el fichero, es decir, que su valor es menor o igual que el número de columnas del fichero, si resulta mayor el número introducido dispara una ventana de error que lo advierte, esta comprobación la realiza mediante las variables “ncolumn” y “columna”. Estos dos bucles son la forma que tiene la aplicación de verificar que la columna existe en el fichero de datos, pero es necesario que el usuario conozca cuál de las columnas contiene los datos ya que esto no es posible chequearlo mediante la aplicación.

Al igual que en el caso de una columna, se obtienen las variables “vibración” y “n” a partir de la variable “ncolumn” obtenida anteriormente. “Vibracion” será un vector columna que contenga los datos recogidos de la señal del ensayo de vibración y “n” el número de datos del ensayo, es decir, el número de filas del vector vibración. Una vez que el programa ha conseguido obtener las variables necesarias para continuar con el desarrollo de la aplicación, este subprograma se cierra automáticamente, para volver al subprograma “EXAMINAR1.fig”.

6.1.5. Resultados

Después de pulsar el botón de análisis se pasa al siguiente subprograma, consta de una ventana gráfica y un programa “.m” asociado que son “RESULTADOS1.fig” y “RESULTADOS1.m” respectivamente. La ventana gráfica, que realiza los cálculos de las variables necesarias para los resultados del análisis (crea las variables “f”, “At”, “tiempo” y “T”, y después las almacena), consta de cuatro botones que se describen a continuación:

```
load n
load frecuencia

f=frecuencia/n*(1:(n/2-1));
At=1/frecuencia;
T=n*At;
tiempo=0:At:T;

save f f -ascii
save At At -ascii
save tiempo tiempo -ascii
save T T -ascii
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "GRAFICAS" PASA A UNA PANTALLA EN LA QUE SE MUESTRAN LOS  
%RESULTADOS GRAFICOS DEL ANÁLISIS  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
GRAFICA1  
  
%-----  
%BOTON "DATOS ESTADISTICOS" PASA A UNA VENTANA EN LA QUE SE CALCULAN  
%LOS DATOS ESTADISTICOS DEL ANALISIS  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
ESTADISTICA  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA PANTALLA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(RESULTADOS1)  
  
%-----  
%BOTON "ATRÁS" CIERRA LA PANTALLA ACTIVA Y VUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
EXAMINAR1  
close(RESULTADOS1)
```

Botón “DATOS ESTADÍSTICOS”. Permite acceder a una parte del programa en el que se calculan los datos estadísticos más importantes de la muestra y se realiza un histograma normalizado de los datos del ensayo.

Esto se hace a través del subprograma llamado “ESTADISTICA.m” explicado más adelante, no se cierra la ventana activa para poder acceder a los otros resultados del análisis.

Botón “GRAFICAS”. Da acceso a otra ventana en la que se visualizan los resultados gráficos del análisis de vibraciones. Llama al siguiente subprograma llamado “GRAFICA1.m”.

Posee dos botones llamados SALIR y ATRÁS, que, como en el resto de subprogramas, sirven para pasar a la ventana anterior y para salir de la aplicación respectivamente.

6.1.6. Estadística

Cuando en la ventana anterior se pulsa el botón llamado DATOS ESTADÍSTICOS la única acción que se realiza es la llamada al siguiente subprograma, éste consiste en una ventana y un ejecutable asociado llamados “ESTADISTICA.fig” y “ESTADISTICA.m” respectivamente. La ventana que representa este programa consta de una serie de cuadros de texto editables, uno que muestra la ruta del fichero que se está analizando y el resto muestra los valores de los datos estadísticos más importantes para el ensayo elegido y tres botones, uno para ver los datos estadísticos, un segundo para visualizar el gráfico del histograma y el tercero para cerrar la ventana.

```
load tline
set(handles.edit15,'string',tline)
%-----
%CUADRO DE TEXTO QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE CON LA RUTA DEL
%FICHERO QUE SE ESTA ANALIZANDO
%-----
function edit15_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit15_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
%-----
%CUADRO DE TEXTO CON EL VALOR EFICAZ QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE
%-----
function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
%-----
%CUADRO DE TEXTO CON EL VALOR MEDIO QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE
%-----
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL VALOR DE PICO QUE SE RELLENA  
%AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL VALOR PICO A PICO QUE SE RELLENA  
%AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL FACTOR DE FORMA QUE SE RELLENA  
%AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL FACTOR DE CRESTA QUE SE RELLENA  
%AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
204
```

“Evolución de una aplicación informática para el análisis y simulación de vibraciones.
ADEVI3.1”

Daniela Vicario Tomaselli


```
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON LA MEDIA QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON LA MEDIANA QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL DESVIACION ESTANDAR QUE SE RELLENA  
%AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL MINIMO QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit10_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end
```

```
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL MAXIMO QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON LA VARIANZA QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON EL SESGO QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO CON LA KURTOSIS QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE  
%-----  
function edit14_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
function edit14_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end
```

```
%-----  
%BOTON "VER DATOS ESTADISTICOS" RELLENA AUTOMATICAMENTE LOS CUADROS  
%DE TEXTO CON LOS VALORES CORRESPONDIENTES  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load n  
load At  
load T  
  
media=mean(vibracion);  
mediana=median(vibracion);  
desviacionstd=std(vibracion);  
minimo=min(vibracion);  
maximo=max(vibracion);  
varianza=var(vibracion);  
covarianza=cov(vibracion);  
sesgo=skewness(vibracion);  
Kurtosis=kurtosis(vibracion);  
  
val_e=0;  
for i=1:n  
    val_e = (((vibracion(i))^2)*At)+val_e;  
end  
v_eficaz = ((val_e)/T)^0.5;  
val_m=0;  
for i=1:n  
    val_m = abs(vibracion(i)*At)+val_m;  
end  
v_medio = val_m/T;  
  
a=abs(max(vibracion));  
b=abs(min(vibracion));  
v_pico=max(a,b);  
v_picopico=a+b;  
f_forma=abs(v_eficaz/v_medio);  
f_cresta= v_pico/v_eficaz;  
  
set(handles.edit7,'string',media);  
set(handles.edit8,'string',mediana);  
set(handles.edit9,'string',desviacionstd);  
set(handles.edit10,'string',minimo);  
set(handles.edit11,'string',maximo);  
set(handles.edit12,'string',varianza);  
set(handles.edit13,'string',sesgo);  
set(handles.edit14,'string',Kurtosis);  
set(handles.edit1,'string',v_eficaz);  
set(handles.edit2,'string',v_medio);  
set(handles.edit3,'string',v_pico);  
set(handles.edit4,'string',v_picopico);  
set(handles.edit5,'string',f_forma);  
set(handles.edit6,'string',f_cresta);
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "HISTOGRAMA NORMALIZADO" MUESTRA EL CORRESPONDIENTE  
%HISTOGRAMA CREADO CON LOS DATOS DEL ANALISIS  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
  
x=-1:0.01:1;  
y=vibracion;  
  
figure(1)  
hist(y,x)  
  
title(' HISTOGRAMA NORMALIZADO ');  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(ESTADISTICA)
```

Cuadros de texto editables. En este subprograma existen múltiples cuadros de texto pero todos se definen de la misma manera, además dentro de sus definiciones de función no se realiza acción ninguna. En primer lugar, carga la variable necesaria en el espacio de trabajo mediante la función de “load”, seguidamente mediante la función “set”, posiciona el valor de la variable “tline” en el cuadro de texto editable de la parte superior de la ventana. Esto permite visualizar en todo momento el fichero de datos que se está analizando, en este caso, el fichero del que se están obteniendo los datos estadísticos. En cada comentario se indica el valor estadístico que va a tener cada uno.

Botón “VER DATOS ESTADÍSTICOS”. La ventana de datos estadísticos aparece vacía en primera instancia, hay que pulsar este botón para poder visualizar los datos estadísticos en los cuadros de texto editables.

Lo que hace el programa es cargar las variables necesarias en el espacio de trabajo mediante la función de “load”. En la definición de esta función también existen otras variables y comandos referidos a los cuadros de texto editables, en primer lugar, halla una serie de variables tales como “media”, “mediana”, “maximo”,..., estas variables almacenan los valores estadísticos de los datos de vibración que se tomaron anteriormente. Con estas variables se definen los valores de la propiedad “string” de cada uno de los cuadros de texto editables, es decir, mediante la función “set” se consigue que los valores de estas variables halladas pasen a ser el texto de los cuadros de texto editables. La mayoría de los valores calculados son hallados directamente con funciones de MATLAB o mediante sencillas operaciones, pero para otros, como el caso del valor eficaz y valor medio, es necesario programar la función, esto se realiza mediante bucles “for” y contadores.

Botón “HISTOGRAMA NORMALIZADO”. Permite generar una ventana nueva en la que se aprecia un histograma normalizado de distribución normal de los datos, en tanto por uno y con media igual a cero, e intervalo $[-1,1]$. Es una ventana gráfica de edición en la que se puede manejar el gráfico, editarlo, tiene posibilidad de zoom, de almacenamiento,...

Botón “SALIR”. Permite cerrar la ventana de los datos estadísticos, como la ventana anterior no se ha cerrado al llamar a esta aplicación no es como salir del programa ya que queda activa la pantalla de “RESULTADOS1.fig”. La programación es la misma que la de cualquier otro botón “SALIR” de cualquier ventana, utilizando la función “close”.

6.1.7. Gráfica

Este subprograma se ejecuta cuando se elige la opción de “GRAFICAS” en la pantalla de “RESULTADOS1.fig” que se ha descrito anteriormente. Se puede decir que es la pantalla que engloba los resultados gráficos del análisis de vibraciones. Como la mayoría de los subprogramas explicados tiene un fichero ejecutable llamado “GRAFICA1.m” y asociado una ventana gráfica que es “GRAFICA.fig”, esta ventana se compone de diferentes botones y un cuadro de texto editable.

```
load tline
set(handles.edit2,'string',tline)

%-----
%CUADRO DE TEXTO QUE SE RELLENA AUTOMATICAMENTE CON LA RUTA DEL
%FICHERO QUE SE ESTA ANALIZANDO
%-----
function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
else
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));
end

%-----
%BOTON "SEÑAL TEMPORAL" REALIZA LA SEÑAL TEMPORAL CON LOS DATOS DE LA
%SEÑAL
%-----
% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

figure(1)
stemplot1
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
stempgraph = (get(handles.pushbutton4,'value'));
evolgraph = 0;
psdgraph = 0;
especevolgraph = 0;
specgramgraph= 0;
wavegraph = 0;
save stempgraph stempgraph -ascii
save evolgraph evolgraph -ascii
save psdgraph psdgraph -ascii
save especevolgraph especevolgraph -ascii
save specgramgraph specgramgraph -ascii
save wavegraph wavegraph -ascii

%-----
%BOTON "ENVOLVENTE" REALIZA LA ENVOLVENTE CON LOS DATOS DE LA SEÑAL
%-----
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
figure(1)
evolplot1

stempgraph = 0;
evolgraph = (get(handles.pushbutton3,'value'));
psdgraph = 0;
especevolgraph = 0;
specgramgraph= 0;
wavegraph = 0;
save stempgraph stempgraph -ascii
save evolgraph evolgraph -ascii
save psdgraph psdgraph -ascii
save especevolgraph especevolgraph -ascii
save specgramgraph specgramgraph -ascii
save wavegraph wavegraph -ascii

%-----
%BOTON "PSD" REALIZA EL PSD CON LOS DATOS DE LA SEÑAL
%-----
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
figure(1)
psdplot1

stempgraph = 0;
evolgraph = 0;
psdgraph = (get(handles.pushbutton1,'value'));
especevolgraph = 0;
specgramgraph = 0;
wavegraph = 0;
save stempgraph stempgraph -ascii
save evolgraph evolgraph -ascii
save psdgraph psdgraph -ascii
save especevolgraph especevolgraph -ascii
save specgramgraph specgramgraph -ascii
save wavegraph wavegraph -ascii
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "ESPECTRO ENVOLVENTE" REALIZA EL ESPECTRO DE LA ENVOLVENTE CON  
%LOS DATOS DE LA SEÑAL  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
figure(1)  
especevolplot1  
  
stempgraph = 0;  
evolgraph = 0;  
psdgraph = 0;  
especevolgraph = (get(handles.pushbutton2,'value'));  
specgramgraph= 0;  
wavegraph = 0;  
save stempgraph stempgraph -ascii  
save evolgraph evolgraph -ascii  
save psdgraph psdgraph -ascii  
save especevolgraph especevolgraph -ascii  
save specgramgraph specgramgraph -ascii  
save wavegraph wavegraph -ascii  
  
%-----  
%BOTON "ESPECTOGRAMA" PASA A UN MENU PARA LA REPRESENTACION GRÁFICA  
%DE LA RELACION TIEMPO-FRECUENCIA DE LA SEÑAL  
%-----  
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
specgramplot1  
stempgraph = 0;  
evolgraph = 0;  
psdgraph = 0;  
especevolgraph = 0;  
specgramgraph= (get(handles.pushbutton11,'value'));  
wavegraph = 0;  
save stempgraph stempgraph -ascii  
save evolgraph evolgraph -ascii  
save psdgraph psdgraph -ascii  
save especevolgraph especevolgraph -ascii  
save specgramgraph specgramgraph -ascii  
save wavegraph wavegraph -ascii  
  
%-----  
%BOTON "TRANSFORMADA WAVELET" PASA A UN MENU PARA LA REPRESENTACION  
%GRÁFICA DE LA TRANSFORMADA WAVELET DE LA SEÑAL  
%-----  
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
stempgraph = 0;  
psdgraph = 0;  
evolgraph = 0;  
especevolgraph = 0;  
specgramgraph = 0;  
wavegraph = (get(handles.pushbutton8,'value'));
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
save stempgraph stempgraph -ascii
save evolgraph evolgraph -ascii
save psdgraph psdgraph -ascii
save especevolgraph especevolgraph -ascii
save specgramgraph specgramgraph -ascii
save wavegraph wavegraph -ascii
```

EXAMINAR3

```
%-----
%BOTON "SALIR" CIERRA LA PANTALLA ACTIVA
%-----
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)

close(GRAFICA1)
```

Se carga la variable “tline”, pues es ésta la que guarda la información sobre cuál es el fichero de datos que se está estudiando y se envía al cuadro de texto editable para que el usuario pueda ver el fichero en el que trabaja.

Cuadro de texto editable. Recoge el nombre del fichero de datos con su ruta correspondiente, la definición de esta función es similar a la del resto de cuadros de texto, no se realizan acciones definidas dentro de la función.

Botón “SEÑAL TEMPORAL”. Muestra en una pantalla independiente y editable, el gráfico de la señal temporal de los datos del ensayo de vibración que se tomó al principio de la aplicación. Llama a otro subprograma llamado “stemplot1.m” que será el encargado de dibujar el gráfico de la señal temporal. Después realiza la definición de ciertas variables que van a servir más adelante como comprobación del botón que ha sido pulsado. Estas variables son “psdgraph”, “stempgraph”, “evolgraph”, “especevolgraph” y “wavegraph”, en el caso del botón PSD, igualamos la variable “stempgraph” a la propiedad “value” del botón (esta propiedad es igual a uno cuando se ha pulsado el botón) y el resto de variables se igualan a cero directamente, más adelante se aclara el porqué de estas variables y sus valores. La última acción es preservar las variables.

Botón “ENVOLVENTE”. Con este botón se visualiza en otra ventana la gráfica de la envolvente de la señal que se está analizando. Se programa de forma análoga al botón “SEÑAL TEMPORAL” explicado anteriormente. En este caso se llama al subprograma “evolplot1.m” y por tanto la variable a la que se le asigna el valor de la propiedad “value” del botón es “evolgraph”, el resto de las líneas de comando son idénticas al botón anterior.

Botón “PSD”. Permite visualizar el gráfico de PSD de los datos de vibración en una pantalla independiente que permite su edición. Por un lado, llama a otro subprograma llamado “psdplot1.m” que será el que realmente crea el gráfico psd en los ejes. Por tanto, la variable a la que se asigna el valor de la propiedad “value” del botón es “psdgraph”, el resto es igual a los botones anteriores.

Botón “ESPECTRO DE ENVOLVENTE”. Este botón realiza la gráfica del espectro de la envolvente en otra ventana. Se programa igual que los otros tres botones que realizan gráficas en esta ventana, de tal manera que llama al subprograma “especevolplot1.m” para realizar el gráfico del espectro de envolvente en los ejes activos e iguala la variable “especevolgraph” con la propiedad “value” del botón pulsado, es decir le asigna el valor de uno, reiniciando el resto de variables a cero. Todo lo demás que se encuentra programado en esta función es igual que en el resto.

Botón “ESPECTROGRAMA”. Este botón realiza la gráfica del espectrograma con respecto a la señal temporal y la frecuencia en otra ventana. El subprograma al que se accede para obtener el espectrograma se llama “specgramplot1.m” e iguala la variable “specgramgraph” con la propiedad “value” del botón pulsado, valor uno, reiniciando el resto de variables a cero. Todo lo demás es igual a los botones anteriores.

Botón “WAVELET”. Este botón abre otra ventana que nos introduce en nuevo menú de la aplicación, en el cual se nos pedirán diferentes datos necesarios para calcular y dibujar la transformada Wavelet de la señal correspondiente.

Botón “SALIR”. Se emplea para cerrar la ventana activa, al igual que en el caso del subprograma “ESTADISTICA.m” no sale de la aplicación ya que la ventana perteneciente a “RESULTADOS1.m” sigue activa.

6.1.8. Stempplot1

Este subprograma actúa cuando desde la ventana de “GRAFICA1.fig” se pulsa el botón de “SEÑAL TEMPORAL”. Representa en una ventana independiente el gráfico de la señal temporal de los datos de vibración de forma que se pueda manejar y editar para un estudio más detallado. Este subprograma sólo contiene un fichero denominado “stempplot1.m” y no contiene fichero gráfico asociado, la programación de este fichero es la siguiente:

```
% SUBPROGRAMA "STEMPLOT1.M"  
% GENERA UNA VENTANA NUEVA CON EL GRAFICO  
% DE LA SEÑAL TEMPORAL PARA SU EDICION Y MANEJO  
load tiempo;  
load vibracion;  
load n;  
  
plot(tiempo(1:n-1),vibracion(1:n-1));
```

```
grid
xlabel(' TIEMPO (s) ',FontSize,12,Fontname,'Arial')
ylabel(' SEÑAL ',FontSize,12,Fontname,'Arial')
title(' SEÑAL TEMPORAL ',FontSize,14,Fontname,'Arial')
```

En esta nueva ventana el gráfico se crea de la siguiente manera: el subprograma carga las variables que necesita, en este caso “tiempo”, “vibracion” y “n”. Y luego se utiliza la función “plot” para visualizar la gráfica. Después se crea un “grid” o mallado para seguir mejor los puntos característicos hasta los ejes. Se les da un título a los ejes y a la gráfica.

Los siguientes subprogramas (evolplot1, psdplot1, especevolplot1 y dtempfrecplot1) se generan creando el correspondiente fichero “.m”, pero no el fichero gráfico asociado.

6.1.9. Evolplot1

Este subprograma calcula los datos necesarios para el gráfico de la envolvente de la señal. Mediante la función “plot” de este subprograma se genera una ventana independiente de la ventana activa con el gráfico de la envolvente y, por otro lado, también define títulos -para los ejes y el gráfico generado- y una cuadrícula que permite una mejor identificación de puntos.

```
% SUBPROGRAMA "EVOLPLOT1.M"
% GENERA UNA VENTANA NUEVA CON EL GRAFICO
% DE LA ENVOLVENTE DE LA SEÑAL PARA SU EDICION Y MANEJO
```

```
load tiempo;
load vibracion;
load n;

H=hilbert(vibracion);
evol=abs(H);

plot(tiempo(1:n-1),evol(1:n-1))

grid
xlabel(' TIEMPO (s) ',FontSize,12,Fontname,'Arial')
ylabel(' SEÑAL ',FontSize,12,Fontname,'Arial')
title(' ENVOLVENTE DE LA TRANSFORMADA DE HILBERT', FontSize,14,Fontname,'Arial')
```

6.1.10. Psdplot1

Representa en una ventana independiente el gráfico PSD de la señal.

```
% SUBPROGRAMA "PSDPLOT1.M"  
% GENERA UNA VENTANA NUEVA CON EL GRAFICO  
% PSD PARA SU EDICION Y MANEJO  
load vibracion;  
load n;  
load frecuencia;  
  
incre=1/frecuencia;  
  
Y=fft(vibracion,n);  
Pyy=Y.*conj(Y)*incre/(n/2);  
  
f=frecuencia/n*(1:(n/2-1));  
  
plot(f(1:n/2-1),Pyy(1:n/2-1))  
grid  
xlabel(' FRECUENCIA (Hz) ','FontSize',12,'Fontname','Arial')  
ylabel(' DENSIDAD DE POTENCIA ESPECTRAL ','FontSize',12,'Fontname','Arial')  
title(' ESPECTRO DE POTENCIA ','FontSize',14,'Fontname','Arial')
```

Este subprograma representa la forma de realizar la gráfica de PSD. Crea la gráfica en una ventana independiente desde la cual se puede editar el gráfico directamente. Solo se compone de un fichero llamado “psdplot1.m” sin tener fichero gráfico “.fig” asociado.

En esta nueva ventana se crea un “grid” o mallado para seguir mejor los puntos característicos hasta los ejes. Se les da un título a los ejes y a la gráfica. El gráfico se crea de la siguiente manera: el subprograma carga las variables que necesita, en este caso “vibracion”, “n” y “f”. La generación del gráfico es sencilla gracias a las funciones que ya tiene definidas MATLAB. Para calcular la Transformada de Fourier, FFT, solamente es necesario utilizar la función “fft” de MATLAB y tener los datos de vibración y el número de puntos. Una vez obtenida la FFT de la señal se calcula la densidad de potencia espectral, Pyy, este valor es necesario ya que el valor de la FFT no se utiliza para la representación gráfica, para una correcta visualización de los resultados se utiliza la potencia espectral o la densidad de potencia espectral, que proporciona una idea de la cantidad de energía en cada frecuencia. Una vez definidos los valores de los ejes x e y sólo queda utilizar la función “plot” para dibujarlos.



6.1.11. Especevolplot1

Realiza los cálculos necesarios para generar una gráfica en una ventana independiente, esta ventana nueva tiene los controles necesarios para el manejo de dicha gráfica así como los títulos de los ejes y de la propia gráfica. Es muy parecida a la gráfica “PSD”, lo que es diferente, es que la Transformada de Fourier se realiza con la envolvente de la Transformada de Hilbert, mientras que la gráfica “PSD” lo realiza con los datos de vibración.

```
% SUBPROGRAMA "ESPECEVOLPLOT1.M"  
% GENERA UNA VENTANA NUEVA CON EL GRAFICO  
% DEL ESPECTRO DE LA ENVOLVENTE DE LA SEÑAL  
% PARA SU EDICION Y MANEJO  
  
load n;  
load vibracion;  
load frecuencia;  
  
incre=1/frecuencia;  
  
H=hilbert(vibracion);  
evol=abs(H);  
  
Y=fft(evol,n);  
Pyy=Y.*conj(Y)*incre/(n/2);  
  
f=frecuencia/n*(1:(n/2-1));  
  
plot(f(8:n/2-1),Pyy(8:n/2-1))  
grid  
xlabel(' FRECUENCIA (Hz) ','FontSize',12,'Fontname','Arial')  
ylabel(' PSD DE LA ENVOLVENTE ','FontSize',12,'Fontname','Arial')  
title(' ESPECTRO DE ENVOLVENTE ','FontSize',14,'Fontname','Arial')
```

6.1.12. Specgramplot1

Representa en una ventana nueva el gráfico de ESPECTROGRAMA. Este fichero ocupa 2.820 líneas de código. Por ser tan extenso, no se mostrará para no hacer tan voluminosa la redacción de este proyecto, pero está incluido en el CD-ROM que acompaña a este proyecto. Este fichero está localizado en la siguiente ruta: “C:\MATLAB7\toolbox\signal\sigdemos\specgramdemo.m”, lo que se ha hecho es entender el programa y modificar las variables, pues se quiere estudiar unos determinados parámetros, poner nombre a los títulos, a los ejes, mensajes de error,...

6.1.13. Examinar3

Se llega a este subprograma pulsando el botón de “TRANSFORMADA WAVELET” de la pantalla “GRAFICA1”. Consta de un fichero con el código “EXAMINAR3.m” y su correspondiente fichero gráfico, “EXAMINAR3.fig”.

En la pantalla encontramos dos cuadros de texto editables. El primero pide la velocidad de giro y el segundo el número de vueltas. Ambos se rellenan manualmente y almacenan datos para el cálculo de la señal.

Además en la ventana hay tres botones: “GRAFICAS”, “ATRÁS” Y “SALIR”. El primero graba los datos y da paso a otra ventana en la que se seguirán pidiendo condiciones para el desarrollo de la transformada. Esta nueva pantalla se llamará “ESCALA”. El Botón “SALIR” cierra la aplicación y el botón “ATRÁS” vuelve a la pantalla anterior, en este caso, “GRAFICA1”. Estos botones se programan como tantos otros mencionados anteriormente, por lo que no se desarrollarán. El código es:

```
%-----  
%CUADRO DE TEXTO EN EL QUE SE RELLENARA MANUALMENTE EL VALOR DE LA  
%FRECUENCIA DE LA SEÑAL DE LA QUE SE QUIERE REPRESENTAR LA WAVELET  
%-----  
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
v=str2double(get(handles.edit3,'string'));  
save v v -ascii  
  
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end  
%-----  
%CUADRO DE TEXTO QUE SE RELLENARA MANUALMENTE CON EL NUMERO DE  
%VUELTAS DESEADAS PARA LA REPRESENTACION GRÁFICA.  
%-----  
function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
numerov=str2double(get(handles.edit4,'string'));  
save numerov numerov -ascii  
  
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
if ispc  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
else  
    set(hObject,'BackgroundColor',get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'));  
end
```

```
%-----  
%BOTON "GRAFICAS" CARGA LOS DATOS NECESARIOS PARA REALIZAR LA  
%COMPARACION Y PASA A LA PANTALLA SIGUIENTE  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% DISPARA ERROR SI NO ESTAN TODOS LOS CAMPOS RELLENOS  
  
tline1=str2double(get(handles.edit3,'string'));  
tline2=str2double(get(handles.edit4,'string'));  
exist1 = isnan(tline1);  
exist2 = isnan(tline2);  
  
if ( exist2 == 1 | exist1 == 1)  
    errordlg('RELLENE TODOS LOS CAMPOS PARA CONTINUAR.','¡¡ERROR!!')  
else  
    ESCALA  
    close(EXAMINAR3)  
end  
  
%-----  
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA PANTALLA ACTIVA Y VUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
GRAFICA1  
close(EXAMINAR3)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA PANTALLA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(EXAMINAR3)
```

Botón “GRAFICAS”. Si el usuario no ha introducido uno o ninguno de los dos cuadros de texto editable aparece una pantalla de ¡¡ERROR!! y éste mensaje aparecerá siempre que se pulse el botón “GRÁFICAS” y no cumpla el requisito de haber rellenado los dos cuadros de texto editable; si, en cambio, cumple con los requisitos, se abre la ventana “ESCALA” y se cierra la ventana activa.

6.1.14. Escala

Esta ventana da a elegir entre un número de escalas para la representación de la transformada Wavelet. Al contrario de las ventanas anteriores, aquí no se trata de pulsar un botón correspondiente a una opción, sino de marcar una de las opciones y después pulsar el botón de “CONTINUAR”. Esta compuesto de un fichero de código “ESCALA.m” y uno de gráfico “ESCALA.fig”.

El código es el siguiente:

```
%-----  
%BOTON "32" PERMITE SELECCIONAR 32 COMO ESCALA  
%-----  
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
set(handles.radiobutton2,'value',0)  
set(handles.radiobutton3,'value',0)  
set(handles.radiobutton4,'value',0)  
set(handles.radiobutton5,'value',0)  
set(handles.radiobutton6,'value',0)  
  
%-----  
%BOTON "64" PERMITE SELECCIONAR 64 COMO ESCALA  
%-----  
% --- Executes on button press in radiobutton2.  
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
set(handles.radiobutton1,'value',0)  
set(handles.radiobutton3,'value',0)  
set(handles.radiobutton4,'value',0)  
set(handles.radiobutton5,'value',0)  
set(handles.radiobutton6,'value',0)  
  
%-----  
%BOTON "128" PERMITE SELECCIONAR 128 COMO ESCALA  
%-----  
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
set(handles.radiobutton1,'value',0)  
set(handles.radiobutton2,'value',0)  
set(handles.radiobutton4,'value',0)  
set(handles.radiobutton5,'value',0)  
set(handles.radiobutton6,'value',0)  
  
%-----  
%BOTON "256" PERMITE SELECCIONAR 256 COMO ESCALA  
%-----  
function radiobutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
set(handles.radiobutton1,'value',0)  
set(handles.radiobutton2,'value',0)  
set(handles.radiobutton3,'value',0)  
set(handles.radiobutton5,'value',0)  
set(handles.radiobutton6,'value',0)
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----
%BOTON "512" PERMITE SELECCIONAR 512 COMO ESCALA
%-----
function radiobutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)

set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton3,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton6,'value',0)

%-----
%BOTON "1024" PERMITE SELECCIONAR 1024 COMO ESCALA
%-----
% --- Executes on button press in radiobutton6.
function radiobutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton2,'value',0)
set(handles.radiobutton3,'value',0)
set(handles.radiobutton4,'value',0)
set(handles.radiobutton5,'value',0)

%-----
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA VENTANA ANTERIOR
%-----
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

EXAMINAR3
close(ESCALA)

%-----
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION
%-----
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

close(ESCALA)
%-----
%BOTON "CONTINUAR" LLEVA A UNA VENTANA EN LA QUE SE ELEGIRA EL TIPO DE
%WAVELET MADRE
%-----
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

valor32=get(handles.radiobutton1,'value');
valor64=get(handles.radiobutton2,'value');
valor128=get(handles.radiobutton3,'value');
valor256=get(handles.radiobutton4,'value');
valor512=get(handles.radiobutton5,'value');
valor1024=get(handles.radiobutton6,'value');
```



```
if(valor32==0 & valor64==0 & valor128==0 & valor256==0 & valor512==0 & valor1024== 0)
    errordlg('SELECCIONE UNA ESCALA PARA CONTINUAR.','¡¡ERROR!!')
else
    save valor32 valor32 -ascii
    save valor64 valor64 -ascii
    save valor128 valor128 -ascii
    save valor256 valor256 -ascii
    save valor512 valor512 -ascii
    save valor1024 valor1024 -ascii

    WAVELET
    close(ESCALA)
end
```

Los botones de cada escala al no ser pulsadores (rápidamente efectúan la función a la que se ha programado), si no que son botones para decidir una de las tantas opciones que hay, se han programado para que al clicar un botón lo que haga es poner a cero el resto de los botones para que cuando se pulse el botón “CONTINUAR”, no se encuentre el programa con que hay dos opciones y los resultados que se vean más adelante sean erróneos.

Botón “CONTINUAR”. Lo que hace es leer el valor que tiene cada botón de la escala porque si no se pulsa ninguno el valor es cero, si, en cambio, se pulsa uno, ese botón cambia el valor de cero a uno. Entonces, una vez leído el valor, se ha hecho un bucle donde si todos los botones de la escala tienen valor cero el programa muestra una ventana advirtiéndole que hay un error y que hay que elegir una escala, mientras que si se ha clicado un botón, al no tener todos valor cero lo que hace es salvar las variables y pasa a la ventana siguiente llamada “WAVELET” y cierra la ventana activa.

Los botones “ATRÁS” y “SALIR” que contiene esta ventana son análogos a todos los vistos anteriormente.

6.1.15. Wavelet

En este subprograma se da a elegir el tipo de Wavelet madre para la representación. La elección se hace pulsando el botón correspondiente a la Wavelet elegida, lo que dará paso a la gráfica, en el caso de que dicha Wavelet sea de orden único, o a otra pantalla para elegir el índice en el caso contrario. Consta de un fichero de código llamado “WAVELET.m” y otro gráfico, “WAVELET.fig”.

Se visualizan nueve botones. Los siete primeros corresponden a los diferentes tipos de Wavelet madre. Los otros dos son los correspondientes a “ATRÁS” y “SALIR”. Estos últimos se programan de forma análoga a lo visto anteriormente.



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

Los botones “DABEUCHIES”, “SYMLET”, “COIFLET” Y “BIORTOGONAL”, Wavelet con múltiples índices, dan paso a una nueva pantalla gráfica para la elección de este.

Por el contrario, los botones “MORLET”, “MEYER” y “MEXICAN HAT”, correspondientes a Wavelet de orden único, contienen directamente el código de la gráfica.

```
load valor32 valor32 -ascii
load valor64 valor64 -ascii
load valor128 valor128 -ascii
load valor256 valor256 -ascii
load valor512 valor512 -ascii
load valor1024 valor1024 -ascii
load At At -ascii
load v v -ascii
load numerov numerov -ascii

s=(valor32*32)+(valor64*64)+(valor128*128)+(valor256*256)+(valor512*512)+(valor1024*1024)
p=numerov*round(1/(v*At));

save s s -ascii
save p p -ascii

%-----
%BOTON "DAUBECHIES" PASA A UNA VENTANA EN LA QUE SE ELEGIRA EL ORDEN DE
%LA DAUBECHIES CON LA QUE SE QUIERE REALIZAR LA COMPARACION
%-----
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

DAUBECHIES
close(WAVELET)

%-----
%BOTON "MORLET" DARA LA REPRESENTACION GRAFICA DE LA TRANSFORMADA
%WAVELET MORLET DE LA SEÑAL
%-----
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

load vibracion
load s
load p

for i=1:p;
    signal(i)=vibracion(i);
end

figure(1)
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'morl','plot');
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "MEXICAN HAT" DARA LA REPRESENTACION GRAFICA DE LA  
%TRANSFORMADA WAVELET MEXICAN HAT DE LA SEÑAL  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
load vibracion  
load s  
load p  
  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'mexh','plot');  
  
%-----  
%BOTON "MEYER" DARA LA REPRESENTACION GRAFICA DE LA TRANSFORMADA  
%WAVELET MEYER DE LA SEÑAL  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'meyr','plot');  
  
%-----  
%BOTON "SYMLET" PASA A UNA VENTANA EN LA QUE SE ELEGIRA EL ORDEN DE LA  
%SYMLET CON LA QUE SE QUIERE REALIZAR LA COMPARACION  
%-----  
% --- Executes on button press in pushbutton7.  
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
SYMLET  
close(WAVELET)  
  
%-----  
%BOTON "COIFLET" PASA A UNA VENTANA EN LA QUE SE ELEGIRA EL ORDEN DE LA  
%COIFLET CON LA QUE SE QUIERE REALIZAR LA COMPARACION  
%-----  
% --- Executes on button press in pushbutton8.  
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
COIFLET  
close(WAVELET)
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "BIORTOGONAL" PASA A UNA VENTANA EN LA QUE SE ELEGIRA EL ORDEN  
%DE LA BIORTOGONAL CON LA QUE SE QUIERE REALIZAR LA COMPARACION  
%-----  
% --- Executes on button press in pushbutton9.  
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
BIORTOGONAL  
close(WAVELET)  
  
%-----  
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR  
%-----  
% --- Executes on button press in pushbutton5.  
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
ESCALA  
close(WAVELET)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
% --- Executes on button press in pushbutton6.  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(WAVELET)
```

Carga primero todos los valores introducidos anteriormente que se vaya a necesitar para la representación de la transformada de Wavelet, como son datos que se debería hacer en los diferentes tipos de Wavelet madre, para ahorrar tiempo se programa fuera de cualquier botón porque si no se debería repetir en cada tipo. Se calcula la escala, la p (número de datos que tendrá la señal), y se salvan dichos valores, para luego en cada tipo de Wavelet madre cargarlas y así poder representar la Wavelet elegida. Se ha creado un subprograma llamado “cwtana” que sustituye al “cwt” del MATLAB para poder personalizar los ejes en los que se representará la Wavelet.

6.1.16. Daubechies

Pide el orden de la Daubechies que se quiere representar y lanza la gráfica. Tiene un fichero de código llamado “DABEUCHIES.m” y su correspondiente fichero gráfico “DABEUCHIES.fig”.

Consta de doce botones. Los diez primeros corresponden a los distintos órdenes. Su programación es, para todos, idéntica. El único cambio es el orden de la Daubechie, que en primer caso no es uno, sino Haar.

Los otros dos botones son “SALIR” y “ATRÁS”, cuya programación ya se conoce.

```
%-----  
%BOTON "HAAR" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 1 O HAAR  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'haar','plot');  
  
%-----  
%BOTON "2" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 2  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db2','plot');  
  
%-----  
%BOTON "3" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 3  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db3','plot');  
  
%-----  
%BOTON "4" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 4  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db4','plot');
```

```
%-----  
%BOTON "5" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 5  
%-----  
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db5','plot');  
  
%-----  
%BOTON "6" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 6  
%-----  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db6','plot');  
  
%-----  
%BOTON "7" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 7  
%-----  
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db7','plot');  
  
%-----  
%BOTON "8" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 8  
%-----  
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db8','plot');
```

```
%-----  
%BOTON "9" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 9  
%-----  
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db9','plot');  
  
%-----  
%BOTON "10" REALIZA LA GRAFICA DE UNA DAUBECHIES DE ORDEN 10  
%-----  
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'db10','plot');  
  
%-----  
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR  
%-----  
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
WAVELET  
close(DAUBECHIES)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(DAUBECHIES)
```

6.1.17. Symlet

Pide el orden de la Symlet que se quiere representar y lanza la gráfica. Tiene un fichero de código llamado “SYMLET.m” y su correspondiente fichero gráfico “SYMLET.fig”.

Consta de diez botones. Los ocho primeros corresponden a los distintos órdenes. Su programación es, para todos, idéntica. Los otros dos botones son “SALIR” y “ATRÁS”, cuya programación ya se conoce. El único cambio es el orden de la Symlet:

```
%-----  
%BOTON "1" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 1  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym1','plot');  
  
%-----  
%BOTON "2" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 2  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym2','plot');  
  
%-----  
%BOTON "3" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 3  
%-----  
% --- Executes on button press in pushbutton3.  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym3','plot');  
  
%-----  
%BOTON "4" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 4  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym4','plot');
```



```
%-----  
%BOTON "5" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 5  
%-----  
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym5','plot');  
  
%-----  
%BOTON "6" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 6  
%-----  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym6','plot');  
  
%-----  
%BOTON "7" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 7  
%-----  
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym7','plot');  
  
%-----  
%BOTON "8" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA SYMLET DE ORDEN 8  
%-----  
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'sym8','plot');
```



```
%-----  
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR  
%-----  
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
WAVELET  
close(SYMLET)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(SYMLET)
```

Como se puede ver, la programación es la misma para todas las Wavelet, cambiando solo el código de representación.

6.1.18. Coiflet

Pide el orden de la Coiflet que se quiere representar y lanza la gráfica. Tiene un fichero de código llamado “COIFLET.m” y su correspondiente fichero gráfico “COIFLET.fig”.

Consta de siete botones. Los cinco primeros corresponden a los distintos órdenes. Al igual que en el caso anterior, la programación es, para todos, idéntica. Los otros dos botones son “SALIR” y “ATRÁS”, cuya programación ya se conoce. El único cambio es el orden de la Coiflet:

```
%-----  
%BOTON "1" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA COIFLET DE ORDEN 1  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'coif1','plot');
```

```
%-----  
%BOTON "2" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA COIFLET DE ORDEN 2  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'coif2','plot');  
  
%-----  
%BOTON "3" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA COIFLET DE ORDEN 3  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'coif3','plot');  
  
%-----  
%BOTON "4" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA COIFLET DE ORDEN 4  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'coif4','plot');  
  
%-----  
%BOTON "5" REPRESENTA GRAFICAMENTE UNA COIFLET DE ORDEN 5  
%-----  
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'coif5','plot');
```



```
%-----  
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA VENTANA ANTERIOR  
%-----  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
WAVELET  
close(COIFLET)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(COIFLET)
```

6.1.19. Biortogonal

Pide el orden de la Biortogonal que se quiere representar y lanza la gráfica. Tiene un fichero de código llamado “BIORTOGONAL.m” y su correspondiente fichero gráfico “BIORTOGONAL.fig”.

Consta de dieciséis botones. Los catorce primeros corresponden a los distintos órdenes. Su programación es, para todos, idéntica. Los otros dos botones son “SALIR” y “ATRÁS”, cuya programación ya se conoce. El único cambio es el orden de la Biortogonal:

```
%-----  
%BOTON "1.3" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
load vibracion  
load s  
load p  
  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior1.3','plot');
```

```
%-----  
%BOTON "1.5" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior1.5','plot');  
%-----  
%BOTON "2.2" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior2.2','plot');  
%-----  
%BOTON "2.4" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior2.4','plot');  
%-----  
%BOTON "2.6" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior2.6','plot');
```



```
%-----  
%BOTON "2.8" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior2.8','plot');  
%-----  
%BOTON "3.1" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior3.1','plot');  
%-----  
%BOTON "3.3" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton8_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior3.3','plot');  
%-----  
%BOTON "3.5" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior3.5','plot');
```

```
%-----  
%BOTON "3.7" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior3.7','plot');  
%-----  
%BOTON "3.9" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior3.9','plot');  
%-----  
%BOTON "4.4" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior4.4','plot');  
%-----  
%BOTON "5.5" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton13_Callback(hObject, eventdata, handles)  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior5.5','plot');
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "6.8" LANZA LA GRAFICA CORRESPONDIENTE A UNA WAVELET  
%BIORTOGONAL DE ESE ORDEN  
%-----  
function pushbutton14_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
load vibracion  
load s  
load p  
for i=1:p;  
    signal(i)=vibracion(i);  
end  
figure(1)  
coefs=cwtana(signal(1:p),1:s,'bior6.8','plot');  
  
%-----  
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA PANTALLA ANTERIOR  
%-----  
function pushbutton15_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
WAVELET  
close(BIORTOGONAL)  
  
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton16_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(BIORTOGONAL)
```

6.1.20. Simulación de vibraciones en rodamientos

Cuando en la ventana de inicio de la aplicación ADEVI 3.1 se elige la opción “SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS”, se pasa a ejecutar el subprograma “EXAMINAR2.m”, que contiene una ventana gráfica asociada llamada “EXAMINAR2.fig”. En esta ventana existen tres opciones que representan los tres defectos en rodamientos que se estudian a continuación:

```
%-----  
%BOTON "ANILLO EXTERIOR" PERMITE SELECCIONAR COMO DEFECTO PARA LA  
%SIMULACION UNO EN EL ANILLO EXTERIOR DEL RODAMIENTO  
%-----  
function radiobutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
set(handles.radiobutton2,'value',0)  
set(handles.radiobutton3,'value',0)
```




Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----
%BOTON "ANILLO INTERIOR" PERMITE SELECCIONAR COMO DEFECTO PARA LA
%SIMULACION UNO EN EL ANILLO INTERIOR DEL RODAMIENTO
%-----
function radiobutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton3,'value',0)

%-----
%BOTON "ELEMENTO RODANTE" PERMITE SELECCIONAR COMO DEFECTO PARA LA
%SIMULACION UNO EN EL ELEMENTO RODANTE DEL RODAMIENTO
%-----
function radiobutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

set(handles.radiobutton1,'value',0)
set(handles.radiobutton2,'value',0)

%-----
%BOTON "CONTINUAR" CONTINUA CON LA SIMULACION SEGUN EL DEFECTO QUE SE
%HA SELECCIONADO
%-----

function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

opcion_ext=get(handles.radiobutton1,'value');
opcion_int=get(handles.radiobutton2,'value');
opcion_bola=get(handles.radiobutton3,'value');
if ( opcion_ext == 0 & opcion_int == 0 & opcion_bola == 0 )
    errordlg('SELECCIONE UN TIPO DE DEFECTO PARA CONTINUAR.','¡¡ERROR!!')
else
    if ( opcion_ext == 1 )
        D_EXTERIOR_otro
        close(EXAMINAR2)
    end
    if ( opcion_int == 1 )
        D_INTERIOR_NUEVO
        close(EXAMINAR2)
    end
    if ( opcion_bola == 1 )
        D_BOLA_NUEVO
        close(EXAMINAR2)
    end
end

%-----
%BOTON "ATRAS" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y VUELVE A LA VENTANA ANTERIOR
%-----
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

PORTADA
close(EXAMINAR2)
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
%-----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
%-----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(EXAMINAR2)
```

Radio button “ANILLO EXTERIOR”. En la ventana de defectología de rodamientos existen tres radio button, el primero de ellos selecciona la opción de defecto en el anillo exterior del rodamiento y las órdenes que se ejecutan al seleccionarlo provocan que “ANILLO EXTERIOR” obtenga el valor uno y los otros dos radio button se ponen a cero para que el programa no se encuentre con que haya dos o más seleccionados. Se hace lo mismo con el radio button “ANILLO INTERIOR” y radio button “ELEMENTO RODANTE”.

Botón “CONTINUAR”. El programa lee el valor que tiene cada radio button porque si no hay uno de los tres que tenga valor uno aparece una pantalla de ¡¡ERROR!!, pidiendo al usuario que pulse uno de los tres radio button y si pulsa varios, el programa se queda con el último que ha pulsado (porque cuando se pulsa uno, los otros reciben el valor de cero, que es como si no estuviera seleccionado, por lo que el programa tiene en su memoria el último seleccionado).

Si, en cambio, uno de los tres tiene valor uno, dependiendo de cuál es se abre un subprograma o se abre otro, en cualquiera de los casos se abre la siguiente ventana del análisis de defectología de rodamientos y la ventana activa se cierra. Los tres subprogramas a los que se puede acceder son: “EXTERIOR.fig” si se pulsa la opción de defecto en anillo exterior, “INTERIOR.fig” si está activada la opción de defecto en anillo interior y “BOLA.fig” si la opción seleccionada es la de defecto en elemento rodante. Para simular estos defectos es necesaria una programación bastante extensa.

Botón “ATRÁS” y botón “SALIR”. Tienen la misma funcionalidad que en el resto de ventanas para pasar a la ventana anterior y salir de la aplicación respectivamente.

6.1.21. Anillo exterior

Cuando en la pantalla anterior se elige la opción de analizar defecto en el anillo exterior del rodamiento y se pulsa el botón continuar aparece la siguiente pantalla que consta de una ventana en la que se piden los parámetros necesarios para la simulación de vibraciones, esta ventana realizada con el módulo GUIDE de MATLAB se llama “D_EXTERIOR_otro.fig” y su fichero “.m” asociado es “D_EXTERIOR_otro.m”, se compone de diferentes cuadros de texto editables y botones.

```
% -----  
% A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO  
% -----  
function varargout = edit1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% A.2. NUMERO DE PUNTOS  
% -----  
function varargout = edit2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.1. VELOCIDAD DE GIRO EN R.P.M.  
% -----  
function varargout = edit28_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.1. VELOCIDAD DE GIRO EN Hz  
% -----  
function edit29_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit29_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit17_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA  
% -----  
function varargout = edit18_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD  
% -----  
function edit30_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit30_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% -----  
% B.5.1. AMPLITUD DE VIBRACION POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO  
% -----  
function edit32_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit32_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.2. RUIDO ALEATORIO  
% -----  
function edit42_Callback(hObject, eventdata, handles)  
function edit42_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.3. AMPLITUD GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO  
% -----  
function edit43_Callback(hObject, eventdata, handles)  
function edit43_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.4. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA POR CARGA SOBRE EL ELEMENTO  
% RODANTE  
% -----  
function edit38_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit38_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% -----  
% B.5.5. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA POR VELOCIDAD SOBRE EL ELEMENTO  
% RODANTE  
% -----  
function edit33_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit33_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.6. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA SOBRE UN ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function edit39_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit39_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit14_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO (°)  
% -----  
function edit31_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit31_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% C.1. NUMERO DE ELMENTOS RODANTES  
% -----  
function varargout = edit5_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function varargout = edit6_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit7_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit8_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA EXTERIOR  
% -----  
function varargout = edit13_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR  
% -----  
function edit34_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit34_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR  
% -----  
function edit35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit35_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% -----  
% D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function edit36_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit36_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL  
% -----  
function edit37_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit37_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% -----  
% D.3. POSICION DEL DEFECTO RESPECTO DEL PUNTO MAS CARGADO  
% -----  
function edit40_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit40_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% DENTRO/FUERA DE LA ZONA DE CARGA  
% -----  
function edit41_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit41_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
  
% -----  
% BOTON "ATRAS" PARA VOLVER A LA VENTANA ANTERIOR LLAMADA  
% RODAMIENTOS  
% -----  
function varargout = pushbutton2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
EXAMINAR2  
close(D_EXTERIOR_otro)  
% -----  
% BOTON "APLICAR" PARA HACER EFECTIVOS LOS CAMBIOS EN LOS CUADROS DE  
% TEXTO DE LA VENTANA  
% -----  
function varargout = pushbutton3_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
  
% DATOS DIRECTOS  
  
% DATOS DE LA MUESTRA  
  
frecuencia = str2double(get(handles.edit1, 'string'));  
N = str2double(get(handles.edit2, 'string'));  
  
% DATOS DEL RODAMIENTO  
% Z = Número de elementos rodantes  
% Dbr = Diámetro del elemento rodante  
% Dm = Diámetro medio del rodamiento  
% Dm = 1/2 * (D. del hueco + D. exterior)  
% Dm = 1/2 * (Dci + Dce)  
% Dci = Diámetro de la circunferencia de contacto interior  
% Dce = Diámetro de la circunferencia de contacto exterior  
% ang_contacto = Angulo de contacto
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
Z = str2double(get(handles.edit5,'string'));
Dbr = str2double(get(handles.edit6,'string'));
Dm = str2double(get(handles.edit7,'string'));
ang_contacto = str2double(get(handles.edit8,'string'));

% defecto = tamaño efectivo del defecto (en milímetros)

defecto = str2double(get(handles.edit13,'string'));

% zona = factor de carga del rodamiento con fallo

zona = str2double(get(handles.edit14,'string'));

% f0 = frecuencia natural del sistema
% Xi = relación de amortiguamiento del sistema

Xi = str2double(get(handles.edit17,'string'));
f0 = str2double(get(handles.edit18,'string'));

% v1 = Velocidad de giro del anillo interior (para anillo exterior fijo)
% beta = Influencia de la velocidad de giro y las fuerzas centrífugas en la amplitud de
%vibración

v1 = str2double(get(handles.edit28,'string'));
beta = str2double(get(handles.edit30,'string'));

% Ai = Amplitud debida a la carga, sin compensar, a su paso por el defecto (carga radial).
% Este valor expresaría la relación entre la carga total aplicada sobre el rodamiento y la
%vibración registrada (medidas realizadas con un acelerómetro y cuya amplificación vendrá
%establecida por un previo acondicionador de la señal vibratoria. Sus unidades podrían ser
%voltios, decibelios u otro tipo unidad en la cuál pueda ser expresada la amplitud de la
%vibración registrada.

Ai = str2double(get(handles.edit32,'string'));

% posicion = Posición del defecto respecto al punto de máxima carga (de 0 a 180º)

posicion = str2double(get(handles.edit40,'string'));

% DATOS DEL RUIDO ALEATORIO
% A_def_ext = Amplitud del ruido aleatorio

A_def_ext = str2double(get(handles.edit42,'string'));

% DATOS DEL DESEQUILIBRIO
% A_gen_dese_ext = Amplitud generada por el desequilibrio

A_gen_dese_ext = str2double(get(handles.edit43,'string'));
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

%CALCULOS INTERMEDIOS

```
if zona > 1
    zona_ang=360; % 0
else zona_ang=180+2*360/(2*pi)*asin(2*zona-1); % 0
end;

% f1 = Frecuencia de giro del anillo interior (para anillo exterior fijo)
% A1 = Amplitud debida a la velocidad de giro y a las fuerzas centrífugas

f1=v1/60;
A1=Ai*f1*beta;

% BPFI = Frecuencia de paso por un defecto en la pista interior de un rodamiento
% BPFO = Frecuencia de paso por un defecto en la pista exterior de un rodamiento
% 2 * BSF = Frecuencia de paso por un defecto en un elemento rodante de un rodamiento
% FTF = Frecuencia del tren fundamental de un rodamiento (Frecuencia de giro de la jaula)

BPFI=1/2*Z*f1*(1+Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi)); % Hz
BPFO=1/2*Z*f1*(1-Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi)); % Hz
BSF=[1/2*f1*(Dm/Dbr)*(1-(Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi))^2)]; % Hz
FTF=1/2*f1*(1-Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi)); % Hz

% F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE

D23=2*BSF;

% En esta simulación se establecerá la carga máxima que soporta el elemento más cargado
% en función de la carga radial (Fr = Ai) que actúa sobre el rodamiento

Fr=Ai;

% Generación de la curva de la integral de distribución de carga en función del factor de carga

T_zona=[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12.5,16.7,25,50]*0.1;
T_Jr=[1/Z 0.1156 0.1590 0.1892 0.2117 0.2288 0.2416 0.2505 0.2559 0.2576 0.2546 0.2289
0.1871 0.1339 0.0711];

% H= Grado del polinomio de ajuste

H=6;
[valor,error]=polyfit(T_zona,T_Jr,H);
Jr=polyval(valor,zona);

% Q_total = Fr / cos(ang_contacto)
% Luego, como se ha visto con anterioridad:
% Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto)]

Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto/180*pi)];
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

% MAXIMA AMPLITUD DE VIBRACION SOBRE ELEMENTO RODANTE

B54 = Q_max_ele + A1;

% VALORES QUE DETERMINAN SI EL DEFECTO ESTA FUERA O DENTRO DE LA ZONA %DE CARGA

DENTRO='DENTRO ZONA DE CARGA';
FUERA='FUERA ZONA DE CARGA';

```
if posicion <= (zona_ang/2)
    Q=Q_max_ele*abs((1-(1/(2*zona)))*(1-cos(pi*posicion/180)))^(1.5));
    set(handles.edit41,'string',DENTRO)
else Q=0;
    set(handles.edit41,'string',FUERA)
end;
```

% ESTE PROGRAMA GENERA UNA SEÑAL TEMPORAL SIMULANDO LA EMITIDA POR %UN RODAMIENTO CON FALLO EN SU ANILLO EXTERIOR CONSIDERANDO %DIFERENTES PARAMETROS

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una
%frecuencia de muestreo "frecuencia"

incre=1/frecuencia; % segundos
T = N*incre;
t=incre:incre:T;

incre_f=frecuencia/N; % Hz
frec=0:incre_f:frecuencia-incre_f;

% DATOS DEL RODAMIENTO

% Dci = Diámetro de la circunferencia de contacto interior
% Dce = Diámetro de la circunferencia de contacto exterior

Dci=Dm-Dbr*cos(ang_contacto/180*pi); % mm
Dce=Dm+Dbr*cos(ang_contacto/180*pi); % mm

fi=BPFO;
fj=FTF;

% alpha = amortiguamiento del sistema

alpha=Xi*f0;

% k = variable adimensional que indica el número de puntos del impacto

k=floor(1/(20*incre))+1;

% m = número de puntos por cada giro completo del eje

m=floor(1/(incre*f1))+1;

244

“Evolución de una aplicación informática para el análisis y simulación de vibraciones.
ADEVI3.1”

Daniela Vicario Tomaselli



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% b = número de puntos entre cada defecto en la pista exterior del rodamiento

b=floor(1/(incre*fi))+1;

% n = número de puntos de la zona cargada

n=floor(m*zona)+1;

% Generación de una señal resultado de la interacción de dos impactos, con cierto retraso de
%uno respecto al otro:
% tita = angulo que abarca el defecto en la pista exterior
% wi = velocidad angular del anillo exterior
% wj = velocidad angular de la jaula
%
tita = 2 * defecto / Dce; % (rad)
wi = 0; % (rad/s)
wj = 2 * pi * fj; % (rad/s)
% retardo = tiempo, en segundos, que transcurre entre el primer y el segundo impacto en el
%defecto
retardo = tita / wj; % (s)

% kj = número de puntos del retardo
kj=floor(retardo/incre)+1; % (puntos)
retardo=kj*incre; % (s)
%+++++
%
% La carga máxima que soporta el elemento más cargado de un rodamiento de bolas, en el
%cual actúan combinadamente cargas radiales y axiales, puede expresarse de dos formas:
%
% Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto)]
%
% Q_max_ele = Fa / [ Ja * Z * sen(ang_contacto)]
%
% donde:
% Fr = Carga radial
% Fa = Carga axial
% Z = Número de elementos rodantes
% ang_contacto = Ángulo de contacto
% Jr = Es la integral de distribución de carga radial y viene expresada en función del factor
%de carga
% Ja = Es la integral de distribución de carga axial y viene expresada en función del factor
%de carga
% zona = Es el factor de carga
% GI = Semi-ángulo abarcado por la zona de carga
%
% zona= 1/2 * [1-cos(GI)]
%
% NOTA- Se supone que la carga combinada está cercana a la igualdad:
%
% Fr / Fa = tang(ang_contacto)
%
%+++++
```

% Generación de la señal de modulación de amplitud considerando el efecto de la velocidad
 %de giro y de la distribución de carga
 % bueno = señal resultante de la zona de carga parcial

```
bueno=zeros(size(t));
for r=1:m:N
    for s=(floor(m/2)+1):1:m
        if (1-(1/(2*zona))*(1-cos(2*pi*f1*t(s-floor(m/2)))))) >= 0
            bueno(r+s-1)=A1+Q_max_ele*abs((1-(1/(2*zona))*(1-cos(2*pi*f1*t(s-floor
(m/2))))))^(1.5));
        else
            bueno(r+s-1)=0;
        end;
    end;
    for s=1:1:(floor(m/2))
        bueno(r+s-1)=bueno(r+m-s);
    end;
end;
```

% Generación de una señal similar a la emitida por un rodamiento con la pista exterior
 %dañada, considerando:
 % · Dos impactos:
 % * Uno de entrada en el defecto
 % * Otro de salida del defecto
 % · Un rodamiento de contacto angular que soporta una carga combinada radial-axial,
 %donde se extrae la amplitud del valor de la carga radial
 % · El efecto derivado de la velocidad de giro y las fuerzas centrífugas
 % · La posición del defecto respecto al elemento más cargado, dentro o fuera de la zona
 %de carga

```
Af=A1+Q;
impulso=zeros(size(t));
for r=1:b:N
    s=1;
    if (r+k+kj)<= N
        for s=1:k
            g1(s)=Af*exp(-alpha*s*incre)*sin(2*pi*f0*s*incre);
        end;
        for s=(k+1):(k+kj)
            g1(s)=0;
        end;
        for s=1:kj
            g2(s)=0;
        end;

        for s=(kj+1):(kj+k)
            g2(s)=Af*exp(-alpha*(s-kj)*incre)*sin(2*pi*f0*(s-kj)*incre);
        end;
        gx=g1-g2;
        for s=1:(k+kj)
            impulso(r+s)=impulso(r+s)+gx(s);
        end;
    else
```

```
for s=1:(N-r)
    g1(s)=Af*exp(-alpha*s*incre)*sin(2*pi*f0*s*incre);
end;
for s=1:kj
    g2(s)=0;
end;
for s=(kj+1):(N-r)
    g2(s)=Af*exp(-alpha*(s-kj)*incre)*sin(2*pi*f0*(s-kj)*incre);
end;
gx=g1-g2;
for s=1:(N-r)
    impulso(r+s)=impulso(r+s)+gx(s);
end;
end;
end;

gh=impulso;

% RUIDO ALEATORIO
amra = (A_def_ext)/3;
longi = length(gh);
ra=random('normal',0,amra,1,longi);

% DESEQUILIBRIO
for s=1:longi
    dese(s)= (A_gen_dese_ext)*sin(2*pi*f1*s*incre);
end;

gh = gh+ra+dese;

vibracion=gh;
n=length(vibracion);

% SALVAR VARIABLES

save frecuencia frecuencia -ascii
save N N -ascii
save A1 A1 -ascii
save f1 f1 -ascii
save Z Z -ascii
save Dbr Dbr -ascii
save Dm Dm -ascii
save ang_contacto ang_contacto -ascii
save Ai Ai -ascii
save defecto defecto -ascii
save zona zona -ascii
save f0 f0 -ascii
save Xi Xi -ascii
save v1 v1 -ascii
save BPFO BPFO -ascii
save FTF FTF -ascii
save BSF BSF -ascii
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
save BPFI BPFI -ascii
save posicion posicion -ascii
save zona_ang zona_ang -ascii
save Q_max_ele Q_max_ele -ascii
save Q Q -ascii
save A_def_ext A_def_ext -ascii
save A_gen_dese_ext A_gen_dese_ext -ascii
save vibracion vibracion -ascii
save n n -ascii
save bueno bueno -ascii
```

% SE ESPECIFICA EL NÚMERO DE DECIMALES QUE SE QUIERE EN LAS SIGUIENTES
%VARIABLES

```
zona_ang=num2str(zona_ang,'%0.2f');
A1=num2str(A1,'%0.4f');
BPFI=num2str(BPFI,'%0.2f');
BPFO=num2str(BPFO,'%0.2f');
FTF=num2str(FTF,'%0.2f');
D23=num2str(D23,'%0.2f');
Q_max_ele=num2str(Q_max_ele,'%0.4f');
B54=num2str(B54,'%0.4f');
```

% DATOS DEPENDIENTES (RESULTADO DE OTROS)

```
set(handles.edit29,'string',f1)
set(handles.edit31,'string',zona_ang)
set(handles.edit33,'string',A1)
set(handles.edit34,'string',BPFI)
set(handles.edit35,'string',BPFO)
set(handles.edit36,'string',D23)
set(handles.edit37,'string',FTF)
set(handles.edit38,'string',Q_max_ele)
set(handles.edit39,'string',B54)
```

APLICAR_DEF_EXT

```
% -----
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION
% -----
```

```
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
close(D_EXTERIOR_otro)
```

Cuadros de texto editables. En esta ventana se presentan diferentes cuadros de texto editables en los cuales la información se introduce manualmente, el modo de actuar en esta ventana es introducir los datos necesarios a partir de los que existen por defecto, al definirlos mediante GUIDE no se realiza ninguna acción sobre ellos, en principio todos se declaran del mismo modo que en programas anteriores.



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

Los cambios existentes entre los cuadros de texto se programan mediante GUIDE, los valores por defecto de los cuadros de texto editables, que hasta ahora siempre se habían representado sin valor por defecto, pueden tener un valor predeterminado modificando la propiedad “string” desde el Property Inspector.

Por otro lado, por ejemplo, el dato de frecuencia de giro en el anillo exterior, f_i , no es susceptible de ser modificado, ya que no se puede editar, en este caso esta propiedad también ha sido modificada a partir del GUIDE de MATLAB cambiando la propiedad “enable” al valor de “inactive” en vez de “on” que es el valor por defecto. Esto ocurre también con los parámetros de amplitud y frecuencia de desalineamiento (A_1 y f_1). Más adelante se explica cómo se van dando valores a estos cuadros de texto.

Se muestra con comentarios qué dato corresponde al cuadro de texto editable.

La ventana posee tres botones, el primero de ellos es el llamado “ATRÁS” y al igual que en el resto de ventanas gráficas permite volver a la pantalla anterior.

Botón “APLICAR”. Los cuadros de texto editables, tienen valores predeterminados y teniendo en cuenta estos datos se han obtenido otros. Por lo que al cambiar los valores de los datos, se necesita recalcular variables que se obtienen por dichos datos, con lo que al pulsar este botón se muestran los nuevos datos obtenidos. Como por ejemplo, los valores de la frecuencia de giro en el anillo exterior f_i , y la amplitud y frecuencia de desalineamiento no son valores que se puedan dar por teclado directamente sino que dependen de otras de las variables introducidas en los cuadros de texto editables, por tanto se calcula con su fórmula una vez definidas las variables necesarias. Las fórmulas empleadas son:

$$\begin{aligned}f_1 &= v_1 / 60; \\ A_1 &= A_i * f_1 * \beta; \\ f_i &= 1/2 * Z * f_1 * (1 - D_{br} / D_m * \cos(\text{ang_contacto} / 180 * \pi));\end{aligned}$$

En este botón, tras definir la función del botón “APLICAR”, se definen las variables necesarias para recoger los valores introducidos en los cuadros de texto editables, se utiliza la función “str2double” para pasar el valor recogido en el cuadro de texto (que será con formato string) a formato numérico de doble precisión.

Una vez definidos los valores necesarios, se obtienen otros a través de fórmulas y una vez obtenidos todos los datos, se almacenan las variables que se utilizarán más adelante mediante la orden “save”. Para asignar los datos a los cuadros de texto correspondientes, se usa la función “set”, especificando previamente la cantidad de decimales que se quiere mostrar en pantalla, con esto se consigue que aparezcan los valores calculados en los cuadros de texto correspondientes a los datos introducidos. Por último, se llama a otro subprograma para que abra una ventana.



Botón “SALIR”. Como en los anteriores subprogramas, lo que hace es cerrar la ventana activa, pero, en este caso, al no haber ninguna ventana más abierta, se cerraría el programa.

6.1.22. Información sobre anillo exterior

Después de pulsar el botón de “APLICAR” en el archivo “D_EXTERIOR_otro.fig”, se abre esta ventana llamada “APLICAR_DEF_EXT.fig”- cuyo fichero asociado se llama “APLICAR_DEF_EXT.m”- para que el usuario pueda realizar distintas acciones (estudiar las gráficas que se obtienen, guardar los datos resultantes y hacer un estudio más completo) con los datos obtenidos en la ventana anterior.

El programa es el siguiente:

```
% -----  
% BOTON "GRAFICAS" PARA VISUALIZAR LOS RESULTADOS GRAFICOS  
% -----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% CARGAR VALORES OBTENIDOS  
  
load frecuencia  
load N  
load f1  
load defecto  
load v1  
load zona_ang  
load vibracion  
load bueno  
  
% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una  
%frecuencia de muestreo "frecuencia"  
  
incre=1/frecuencia; % segundos  
T = N*incre;  
t=incre:incre:T;  
  
incre_f=frecuencia/N; % Hz  
frec=0:incre_f:frecuencia-incre_f;  
  
% Se genera la señal temporal  
gh=vibracion;  
  
% Calculo del ESPECTRO DE POTENCIA de un rodamiento con defecto en la pista de  
%rodadura exterior  
Yi=fft(gh,N);  
Pii=Yi.*conj(Yi)*incre/(N/2);
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% POTENCIA ESPECTRAL de la señal
Potii=incre_f*sum(Pii(1:N/2));
% Calculo de la ENVOLVENTE de la señal temporal de un rodamiento con defecto en la
%pista exterior
Hi=hilbert(gh);
envolvei=abs(Hi);
% Calculo del ESPECTRO DE POTENCIA de la ENVOLVENTE
kai=fft(envolvei,N);
Phh=kai.*conj(kai)*incre/(N/2);
% POTENCIA ESPECTRAL de la ENVOLVENTE
Pothh=incre_f*sum(Phh(1:N/2));

figure(1)
% Figura 1ª:
% línea azul= señal temporal como la emitida por un rodamiento con la pista exterior
%dañada, considerando la modulación de amplitud, el efecto de la velocidad de giro y
%posición dentro de la zona de carga
% línea roja= envolvente de la zona de carga
%
% Figura 2ª:
% línea azul= detalle de la señal temporal del rodamiento con defecto en la pista de
%rodadura exterior
% línea roja= envolvente de la señal anterior calculada como el valor absoluto de la
% transformada de Hilbert
ymayor1=1.1*max(max(abs(gh(1:N/2))),max(abs(bueno(1:1:N/2))));
ymayor12=1.1*max(max(abs(gh(1:round(0.6/(f1*incre))))),max(envolvei(1:round(0.6/(f1*incre))))

subplot(2,1,1)
plot(t,gh,'b','LineWidth',1.5);
titulo=sprintf('SIMULACION de la SEÑAL TEMPORAL emitida por un RODAMIENTO con
DEFECTO en ANILLO EXTERIOR \n Velocidad de giro = %4.0f r.p.m. Zona de Carga =
%5.2fº Tamaño del defecto = %2.2f mm.',v1,zona_ang,defecto);
axis([0 0.2 -ymayor1 ymayor1]);
title(titulo,'FontSize',8,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('TIEMPO (s)','FontSize',8,'Fontname','Arial');
ylabel('AMPLITUD (V)','FontSize',8,'Fontname','Arial');
hold on;
plot(t(1:(N/2)),bueno(1:(N/2)),'r','LineWidth',1)
hold off;

subplot(2,1,2)
plot(t,gh,'b','LineWidth',1.5)
titulo1=sprintf('DETALLE de la SEÑAL TEMPORAL SIMULADA y la ENVOLVENTE');
axis([0 0.6/f1 -ymayor12 ymayor12]);
title(titulo1,'FontSize',11,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('TIEMPO (s)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
ylabel('AMPLITUD (V)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
hold on
plot(t,envolvei,'r','LineWidth',1)
hold off
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
datos=[t' gh'];
save sim_def_ext.txt datos -ascii -TABS;
tline='C:\ADEVI3.1\sim_def_ext.txt';
save tline tline

figure(2)
% Figura 1ª= Espectro de Potencia de la señal anterior
% Figura 2ª= Espectro de Potencia de la Envolvente
ymayor2=1.1*max(Pii(3:N/2));
ymayor3=1.1*max(Phh(3:N/2));

subplot(2,1,1)
plot(frec(1:N/2),Pii(1:N/2),'b','LineWidth',1.5)
axis([0 frecuencia/2 0 ymayor2]);
titulo21=sprintf('ESPECTRO de POTENCIA de un RODAMIENTO con DEFECTO en ANILLO EXTERIOR \n POTENCIA ESPECTRAL TOTAL = %1.6f',Potii);
title(titulo21,'FontSize',10,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('FRECUENCIA (Hz.)','FontSize',10,'Fontname','Arial');
ylabel('PSD ( V ^2 / Hz. )','FontSize',10,'Fontname','Arial');

subplot(2,1,2)
plot(frec(1:N/2),Phh(1:N/2),'r','LineWidth',1.5)
axis([0 f1*frecuencia/100 0 ymayor3]);
titulo22=sprintf('ESPECTRO de POTENCIA de la ENVOLVENTE');
title(titulo22,'FontSize',11,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('FRECUENCIA (Hz.)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
ylabel('PSD ( V ^2 / Hz. )','FontSize',11,'Fontname','Arial');

% -----
% BOTON "GUARDAR DATOS" LLEVA A LA VENTANA QUE TE PERMITE GUARDAR LOS
% DATOS
% -----
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% CARGAR VALORES OBTENIDOS

load frecuencia
load N
load vibracion

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una
% frecuencia de muestreo "frecuencia"

incre=1/frecuencia; % segundos
T = N*incre;
t=incre:incre:T;

matriz=[t; vibracion];
```



```
[filename, pathname, filterindex] = uiputfile( ...
{'*.txt','Documento de texto(*.txt)';...
'*.m','M-files(*.m)';...
'*.mat','MAT-files(*.mat)';...
'*. *','All Files (*.*)'},...
'Guardar como');

tline=[pathname filename];
fid = fopen(tline,'w');
fprintf(fid,'%10.7e %20.7e\n',matriz);
fclose(fid)

save tline tline

% -----
% BOTON "OTROS ANALISIS" LLEVA A LA VENTANA PARA PODER HACER ANÁLISIS
%GRÁFICO O ESTADÍSTICO
% -----
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

RESULTADOS1

% -----
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION
% -----
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)

close(APLICAR_DEF_EXT)
```

En esta ventana se encuentran cuatro botones. *Botón “SALIR”*. Cierra la ventana activa, pero al estar “D_EXTERIOR_otro.fig” abierta, no se cierra el programa por completo.

Botón “GRAFICAS”. Permite mostrar las gráficas de simulación de vibraciones causadas por defectos en rodamientos en pista exterior mediante los parámetros introducidos anteriormente. Los resultados finales son diferentes gráficos de simulación de la señal temporal emitida por el rodamiento, así como su envolvente y, por otro lado, las gráficas del espectro de potencia de la señal y de la envolvente.

Primeramente se cargan las variables halladas mediante el botón aplicar, el siguiente paso es definir las variables necesarias para la representación gráfica (señal temporal, espectro de potencia, envolvente,...). Una vez que se dispone de las variables necesarias, comienza la ejecución propia del programa. Este programa se divide en partes con diferentes funciones:

- Generación de impulsos. En primer lugar, se procede a simular una serie de impulsos mediante la frecuencia natural, o de resonancia y el amortiguamiento ya conocidos.

- Simulación del defecto, como un modelo de caja en el que la bola entra, con aceleración positiva y sale decelerando o con aceleración negativa. Esto genera dos señales diferentes, una positiva y otra negativa, la distancia entre los impulsos de esta señal esta condicionada por el tamaño de defecto. Para hallar la señal total se restan las dos señales obtenidas. Con estos dos pasos se obtiene la simulación de impulsos.
- Serie de impulsos. Una vez simulado un paso por defecto se repite a lo largo del tiempo con una frecuencia conocida f_i , que es la frecuencia de defecto en pista exterior. Esto genera la serie de impulsos requerida.
- Zona de carga y representación gráfica. Posteriormente se obtiene la señal de la zona de carga y una vez que se tienen estos resultados se pasa a representar los diferentes gráficos de esta parte de la aplicación. Es decir, se visualiza la señal temporal simulada en primer lugar y la envolvente de la zona de carga, y se calcula la envolvente de la señal temporal, el espectro de potencia y el espectro de potencia de la envolvente.

Botón “GUARDAR DATOS”. Lo que hace es cargar las variables necesarias, para elaborar los datos que se desean guardar, que se obtienen en forma de una matriz que combina los datos del tiempo y de la señal temporal. Luego, se abre una ventana donde se elige cuál es la ruta y el nombre que se le quiere dar al archivo. Se puede guardar como documento texto (“*.txt”), como fichero (“*.m”), como archivo (“*.mat”) o como cualquier otro tipo. Después, una vez que se ha escrito en la ventana el nombre y dónde se quiere guardar, lo que hace el programa es crear un archivo con características y almacenar los datos en él. Se preserva esta información (nombre y ruta del archivo, variable “tline”) por que, en ciertos casos, el programa pide esta información, más tarde.

Botón “OTROS ANALISIS”. Llama a otro subprograma para que abra una ventana, en la cual se pueden hacer estudios de los defectos con otras distintas técnicas. La ventana que se abre se llama “RESULTADOS1.fig”, su fichero asociado “RESULTADOS1.m”, se ha explicado anteriormente en la parte de “Análisis de vibraciones” (punto 6.5.). Es una ventana que da la opción de hacer un estudio de las gráficas (señal temporal, psd, envolvente, transformada Wavelet,...) o de los datos estadísticos con los nuevos datos.

6.1.23. Anillo interior

Representa la simulación vibratoria causada por un defecto en anillo interior. Esta simulación se genera a partir de parámetros muy similares a los del subprograma “D_EXTERIOR_otro.m”.

La estructura de la ventana es equivalente a la descrita para “D_EXTERIOR_otro.fig” en el apartado “6.1.21. Anillo exterior”. Consta de cuadros de texto editables en los que hay que introducir una serie de parámetros, éstos se cargan mediante la opción del botón “APLICAR”. También tiene la opción del botón “ATRÁS” y “SALIR”.

Los ficheros correspondientes a este programa son “D_INTERIOR_NUEVO.m” y “D_INTERIOR_NUEVO.fig”.

```
% -----  
% A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO  
% -----  
function varargout = edit1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% A.2. NUMERO DE PUNTOS  
% -----  
function varargout = edit2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.1. VELOCIDAD DE GIRO EN R.P.M.  
% -----  
function varargout = edit28_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.1. VELOCIDAD DE GIRO EN Hz  
% -----  
function edit29_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit29_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit17_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA  
% -----  
function varargout = edit18_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD  
% -----  
function edit30_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit30_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.1. AMPLITUD DE VIBRACION POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO  
% -----  
function edit32_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit32_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.2. RUIDO ALEATORIO  
% -----  
function edit42_Callback(hObject, eventdata, handles)  
function edit42_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```



```
% -----  
% B.5.3. AMPLITUD GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO  
% -----  
function edit43_Callback(hObject, eventdata, handles)  
function edit43_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.4. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA POR CARGA SOBRE EL ELEMENTO  
% RODANTE  
% -----  
function edit38_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit38_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.5. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA POR VELOCIDAD SOBRE EL ELEMENTO  
% RODANTE  
% -----  
function edit33_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit33_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.6. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA SOBRE UN ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function edit39_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit39_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit14_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO (°)  
% -----  
function edit31_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit31_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES  
% -----  
function varargout = edit5_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function varargout = edit6_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
  
% -----  
% C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit7_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit8_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA EXTERIOR  
% -----  
function varargout = edit13_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
```

```
% -----
% D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR
% -----
function edit34_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function edit34_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
% D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR
% -----
function edit35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function edit35_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
% D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE
% -----
function edit36_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function edit36_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----
% D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL
% -----
function edit37_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
function edit37_Callback(hObject, eventdata, handles)
% -----

% -----
% BOTON "ATRAS" PARA VOLVER A LA VENTANA ANTERIOR LLAMADA
% RODAMIENTOS
% -----
function varargout = pushbutton2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)

EXAMINAR2
close(D_INTERIOR_NUEVO)
% -----
% BOTON "APLICAR" PARA HACER EFECTIVOS LOS CAMBIOS EN LOS CUADROS DE
% TEXTO DE LA VENTANA
% -----
function varargout = pushbutton3_Callback(h, eventdata, handles, varargin)

% DATOS DIRECTOS

% DATOS DE LA MUESTRA

frecuencia = str2double(get(handles.edit1, 'string'));
N = str2double(get(handles.edit2, 'string'));

% DATOS DEL RODAMIENTO
% Z = Número de elementos rodantes
% Dbr = Diámetro del elemento rodante
% Dm = Diámetro medio del rodamiento
% Dm = 1/2 * (D. del hueco + D. exterior)
% Dm = 1/2 * (Dci + Dce)
% Dci = Diámetro de la circunferencia de contacto interior
% Dce = Diámetro de la circunferencia de contacto exterior
% ang_contacto = Angulo de contacto
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
Z = str2double(get(handles.edit5,'string'));
Dbr = str2double(get(handles.edit6,'string'));
Dm = str2double(get(handles.edit7,'string'));
ang_contacto = str2double(get(handles.edit8,'string'));

% defecto = tamaño efectivo del defecto (en milímetros)

defecto = str2double(get(handles.edit13,'string'));

% zona = factor de carga del rodamiento con fallo

zona = str2double(get(handles.edit14,'string'));

% f0 = frecuencia natural del sistema
% Xi = relacion de amortiguamiento del sistema

Xi = str2double(get(handles.edit17,'string'));
f0 = str2double(get(handles.edit18,'string'));

% v1 = Velocidad de giro del anillo interior (para anillo exterior fijo)
% beta = Influencia de la velocidad de giro y las fuerzas centrífugas en la amplitud de
%vibración

v1 = str2double(get(handles.edit28,'string'));
beta = str2double(get(handles.edit30,'string'));

% Ai = Amplitud debida a la carga, sin compensar, a su paso por el defecto (carga radial).
% Este valor expresaría la relación entre la carga total aplicada sobre el rodamiento y la
%vibración registrada (medidas realizadas con un acelerómetro y cuya amplificación vendrá
%establecida por un previo acondicionador de la señal vibratoria. Sus unidades podrían ser
%voltios, decibelios u otro tipo unidad en la cual pueda ser expresada la amplitud de la
%vibración registrada.

Ai = str2double(get(handles.edit32,'string'));

% DATOS DEL RUIDO ALEATORIO
% A_def_int = Amplitud del ruido aleatorio

A_def_int = str2double(get(handles.edit42,'string'));

% DATOS DEL DESEQUILIBRIO
% A_gen_dese_int = Amplitud generada por el desequilibrio

A_gen_dese_int = str2double(get(handles.edit43,'string'));

%CALCULOS INTERMEDIOS

if zona > 1
    zona_ang=360; % 0
else zona_ang=180+2*360/(2*pi)*asin(2*zona-1); % 0
end;
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% f1 = Frecuencia de giro del anillo interior (para anillo exterior fijo)
% A1 = Amplitud debida a la velocidad de giro y a las fuerzas centrífugas

f1=v1/60;
A1=Ai*f1*beta;

% BPFI = Frecuencia de paso por un defecto en la pista interior de un rodamiento
% BPFO = Frecuencia de paso por un defecto en la pista exterior de un rodamiento
% 2 * BSF = Frecuencia de paso por un defecto en un elemento rodante de un rodamiento
% FTF = Frecuencia del tren fundamental de un rodamiento (Frecuencia de giro de la jaula)

BPFI=1/2*Z*f1*(1+Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi));           % Hz
BPFO=1/2*Z*f1*(1-Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi));           % Hz
BSF=[1/2*f1*(Dm/Dbr)*(1-(Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi))^2)]; % Hz
FTF=1/2*f1*(1-Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi));               % Hz

% F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE

D23=2*BSF;

% En esta simulación se establecerá la carga máxima que soporta el elemento más cargado
% en función de la carga radial (Fr = Ai) que actúa sobre el rodamiento

Fr=Ai;

% Generación de la curva de la integral de distribución de carga en función del factor de carga

T_zona=[0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12.5,16.7,25,50]*0.1;
T_Jr=[1/Z 0.1156 0.1590 0.1892 0.2117 0.2288 0.2416 0.2505 0.2559 0.2576 0.2546 0.2289
0.1871 0.1339 0.0711];

% H= Grado del polinomio de ajuste

H=6;
[valor,error]=polyfit(T_zona,T_Jr,H);
Jr=polyval(valor,zona);

% Q_total = Fr / cos(ang_contacto)
% Luego, como se ha visto con anterioridad:
% Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto)]

Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto/180*pi)];

% MAXIMA AMPLITUD DE VIBRACION SOBRE ELEMENTO RODANTE

B54 = Q_max_ele + A1;

% ESTE PROGRAMA GENERA UNA SEÑAL TEMPORAL SIMULANDO LA EMITIDA POR
% UN RODAMIENTO CON FALLO EN SU ANILLO INTERIOR CONSIDERANDO
% DIFERENTES PARAMETROS
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una %frecuencia de muestreo "frecuencia"

incre=1/frecuencia; % segundos
T = N*incre;
t=incre:incre:T;

incre_f=frecuencia/N; % Hz
frec=0:incre_f:frecuencia-incre_f;

% DATOS DEL RODAMIENTO

% Dci = Diámetro de la circunferencia de contacto interior

% Dce = Diámetro de la circunferencia de contacto exterior

Dci=Dm-Dbr*cos(ang_contacto/180*pi); % mm
Dce=Dm+Dbr*cos(ang_contacto/180*pi); % mm

fi=BPFI;
fj=FTF;

% alpha = amortiguamiento del sistema

alpha=Xi*f0;

% k = variable adimensional que indica el número de puntos del impacto
k=floor(1/(20*incre))+1;

% m = número de puntos por cada giro completo del eje
m=floor(1/(incre*f1))+1;

% b = número de puntos entre cada defecto en la pista interior del rodamiento
b=floor(1/(incre*fi))+1;

% n = número de puntos de la zona cargada
n=floor(m*zona)+1;

% Generación de una señal resultado de la interacción de dos impactos, con cierto retraso de %uno respecto al otro

%

% tita = ángulo que abarca el defecto en la pista interior

% wi = velocidad angular del anillo interior

% wj = velocidad angular de la jaula

%

tita = 2 * defecto / Dci; % (rad)
wi = 2 * pi * f1; % (rad/s)
wj = 2 * pi * fj; % (rad/s)

% retardo = tiempo, en segundos, que transcurre entre el primer y el segundo impacto en el %defecto

retardo = tita / (wi - wj); % (s)

Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% kj = numero de puntos del retardo
kj=floor(retardo/incre)+1;
retardo=kj*incre;          % puntos

%+++++
%
% La carga máxima que soporta el elemento más cargado de un rodamiento de bolas, en el
% cual actúan combinadamente cargas radiales y axiales, puede expresarse de dos formas:
%
%   Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto)]
%
%   Q_max_ele = Fa / [ Ja * Z * sen(ang_contacto)]
%
% donde:
%   Fr = Carga radial
%   Fa = Carga axial
%   Z = Numero de elementos rodantes
%   ang_contacto = Angulo de contacto del rodamiento
%   Jr = Es la integral de distribución de carga radial y viene expresada en función del factor
% de carga
%   Ja = Es la integral de distribución de carga axial y viene expresada en función del
% factor de carga
%   zona = Es el factor de carga
%   Gl = Semi-angulo abarcado por la zona de carga
%
%       zona= 1/2 * [1-cos(Gl)]
%
%
% NOTA- Se supone que la carga combinada está cercana a la igualdad:
%
%       Fr / Fa = tang(ang_contacto)
%
%+++++

% Generación de la señal de modulación de amplitud considerando el efecto de la velocidad
% de giro y de la distribución de carga
% bueno = señal resultante de la zona de carga parcial

bueno=zeros(size(t));
for r=1:m:N
    for s=(floor(m/2)+1):1:m
        if (1-(1/(2*zona))*(1-cos(2*pi*f1*t(s-floor(m/2)))))) >= 0
            bueno(r+s-1)=A1+Q_max_ele*abs((1-(1/(2*zona))*(1-cos(2*pi*f1*t(s-floor
(m/2))))))^(1.5));
        else
            bueno(r+s-1)=0;
        end;
    end;
    for s=1:1:(floor(m/2))
        bueno(r+s-1)=bueno(r+m-s);
    end;
end;
```

```
% Generación de una señal similar a la emitida por un rodamiento con la pista interior
%dañada, considerando:
%   · Dos impactos:
%       * Uno de entrada en el defecto.
%       * Otro de salida del defecto.
%   · Un rodamiento de contacto angular que soporta una carga combinada radial-axial,
%donde se extrae la amplitud del valor de la carga radial.
%   · El efecto derivado de la velocidad de giro.
%   · La modulación de amplitud inducida por la zona de carga.
impulso=zeros(size(t));
for r=1:b:N
    s=1;
    if (r+k+kj)<= N
        if bueno(r+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=0;
        end;

        for s=1:k
            g1(s)=Af*exp(-alpha*s*incre)*sin(2*pi*f0*s*incre);
        end;
        for s=(k+1):(k+kj)
            g1(s)=0;
        end;
        for s=1:kj
            g2(s)=0;
        end;
        if bueno(r+kj+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=0;
        end;
        for s=(kj+1):(kj+k)
            g2(s)=Af*exp(-alpha*(s-kj)*incre)*sin(2*pi*f0*(s-kj)*incre);
        end;
        gx=g1-g2;
        for s=1:(k+kj)
            impulso(r+s)=impulso(r+s)+gx(s);
        end;
    else
        if bueno(r+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=0;
        end;
        for s=1:(N-r)
            g1(s)=Af*exp(-alpha*s*incre)*sin(2*pi*f0*s*incre);
        end;
        for s=1:kj
            g2(s)=0;
        end;
    end;
end;
```

```
if (r+kj+1) < N
    if bueno(r+kj+1) > 0
        Af=bueno(r);
    else
        Af=0;
    end;
    for s=(kj+1):(N-r)
        g2(s)=Af*exp(-alpha*(s-kj)*incre)*sin(2*pi*f0*(s-kj)*incre);
    end;
end;

gx=g1-g2;
for s=1:(N-r)
    impulso(r+s)=impulso(r+s)+gx(s);
end;
end;
end;

gh=impulso;

% RUIDO ALEATORIO
amra = (A_def_int)/3;
longi = length(gh);
ra=random('normal',0,amra,1,longi);

% DESEQUILIBRIO
for s=1:longi
    dese(s)= (A_gen_dese_int)*sin(2*pi*f1*s*incre);
end;

gh = gh+ra+dese;

vibracion=gh;
n=length(vibracion);

% SALVAR VARIABLES

save frecuencia frecuencia -ascii
save N N -ascii
save A1 A1 -ascii
save f1 f1 -ascii
save Z Z -ascii
save Dbr Dbr -ascii
save Dm Dm -ascii
save ang_contacto ang_contacto -ascii
save Ai Ai -ascii
save defecto defecto -ascii
save zona zona -ascii
save f0 f0 -ascii
save Xi Xi -ascii
save v1 v1 -ascii
save BPFO BPFO -ascii
```



```
save FTF FTF -ascii
save BSF BSF -ascii
save BPFI BPFI -ascii
save zona_ang zona_ang -ascii
save Q_max_ele Q_max_ele -ascii
save A_def_int A_def_int -ascii
save A_gen_dese_int A_gen_dese_int -ascii
save vibracion vibracion -ascii
save n n -ascii
save bueno bueno -ascii
```

% SE ESPECIFICA EL NÚMERO DE DECIMALES QUE SE QUIERE EN LAS SIGUIENTES
%VARIABLES

```
zona_ang=num2str(zona_ang,'%0.2f');
A1=num2str(A1,'%0.4f');
BPFI=num2str(BPFI,'%0.2f');
BPFO=num2str(BPFO,'%0.2f');
FTF=num2str(FTF,'%0.2f');
D23=num2str(D23,'%0.2f');
Q_max_ele=num2str(Q_max_ele,'%0.4f');
B54=num2str(B54,'%0.4f');
```

% DATOS DEPENDIENTES (RESULTADO DE OTROS)

```
set(handles.edit29,'string',f1)
set(handles.edit31,'string',zona_ang)
set(handles.edit33,'string',A1)
set(handles.edit34,'string',BPFI)
set(handles.edit35,'string',BPFO)
set(handles.edit36,'string',D23)
set(handles.edit37,'string',FTF)
set(handles.edit38,'string',Q_max_ele)
set(handles.edit39,'string',B54)
```

APLICAR_DEF_INT

```
% -----
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION
% -----
```

```
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
close(D_INTERIOR_NUEVO)
```

6.1.24. Información sobre anillo interior

Está programado igual que el “6.1.22. Información sobre anillo exterior”, pero se llama este subprograma “APLICAR_DEF_INT.fig” y su fichero asociado “APLICAR_DEF_INT.m”.



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% -----  
% BOTON "GRAFICAS" PARA VISUALIZAR LOS RESULTADOS GRAFICOS  
% -----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
% CARGAR VALORES OBTENIDOS  
  
load frecuencia  
load N  
load f1  
load defecto  
load v1  
load zona_ang  
load vibracion  
load bueno  
  
% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una  
%frecuencia de muestreo "frecuencia"  
  
incre=1/frecuencia; % segundos  
T = N*incre;  
t=incre:incre:T;  
  
incre_f=frecuencia/N; % Hz  
frec=0:incre_f:frecuencia-incre_f;  
  
% Se genera la señal temporal  
gh=vibracion;  
  
% Cálculo del ESPECTRO DE POTENCIA de un rodamiento con defecto en la pista de  
%rodadura interior  
Yi=fft(gh,N);  
Pii=Yi.*conj(Yi)*incre/(N/2);  
  
% POTENCIA ESPECTRAL de la señal  
Potii=incre_f*sum(Pii(1:N/2));  
  
% Cálculo de la ENVOLVENTE de la señal temporal de un rodamiento con defecto en la pista  
%interior  
Hi=hilbert(gh);  
envolvei=abs(Hi);  
  
% Cálculo del ESPECTRO DE POTENCIA de la ENVOLVENTE  
kai=fft(envolvei,N);  
Phh=kai.*conj(kai)*incre/(N/2);  
  
% POTENCIA ESPECTRAL de la ENVOLVENTE  
Potth=incre_f*sum(Phh(1:N/2));
```

```
figure(1)
% Figura 1ª:
% línea azul= señal temporal como la emitida por un rodamiento con la pista interior dañada,
% considerando la modulación de amplitud, el efecto de la velocidad de giro y la zona de carga
% línea roja= envolvente de la zona de carga
%
% Figura 2ª:
% línea azul= detalle de la señal temporal del rodamiento con defecto en la pista de rodadura
% interior
% línea roja= envolvente de la señal anterior calculada como el valor absoluto de la
% transformada de Hilbert
ymayor1=1.1*max(max(abs(gh(1:N/2))),max(abs(bueno(1:1:N/2))));
ymayor12=1.1*max(max(abs(gh(1:round(0.6/(f1*incre)))),max(envolvei(1:round(0.6/(f1*incre)))))

subplot(2,1,1)
plot(t,gh,'b','LineWidth',1.5);
titulo=sprintf('SIMULACION de la SEÑAL TEMPORAL emitida por un RODAMIENTO con DEFECTO en ANILLO INTERIOR \n Velocidad de giro = %4.0f r.p.m. Zona de Carga = %5.2fº Tamaño del defecto = %2.2f mm.',v1,zona_ang,defecto);
axis([0 0.2 -ymayor1 ymayor1]);
title(titulo,'FontSize',8,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('TIEMPO (s)','FontSize',8,'Fontname','Arial');
ylabel('AMPLITUD (V)','FontSize',8,'Fontname','Arial');
hold on;
plot(t(1:N),bueno(1:N),'r','LineWidth',1)
hold off;

subplot(2,1,2)
plot(t,gh,'b','LineWidth',1.5)
titulo1=sprintf('DETALLE de la SEÑAL TEMPORAL SIMULADA y la ENVOLVENTE');
axis([0 0.6/f1 -ymayor12 ymayor12]);
title(titulo1,'FontSize',11,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('TIEMPO (s)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
ylabel('AMPLITUD (V)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
hold on
plot(t,envolvei,'r','LineWidth',1)
hold off

datos=[t' gh'];
save sim_def_int.txt datos -ascii -TABS;
tline='C:\ADEVI3.1\sim_def_int.txt';
save tline tline

figure(2)
% Figura 1ª= Espectro de Potencia de la señal anterior
% Figura 2ª= Espectro de Potencia de la Envolvente
ymayor2=1.1*max(Pii(3:N/2));
ymayor3=1.1*max(Phh(3:N/2));
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
subplot(2,1,1)
plot(frec(1:N/2),Pii(1:N/2),'b','LineWidth',1.5)
axis([0 frecuencia/2 0 ymayor2]);
titulo21=sprintf('ESPECTRO de POTENCIA de un RODAMIENTO con DEFECTO en ANILLO
INTERIOR \n POTENCIA ESPECTRAL TOTAL = %1.6f',Potii);
title(titulo21,'FontSize',10,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('FRECUENCIA (Hz.)','FontSize',10,'Fontname','Arial');
ylabel('PSD ( V ^2 / Hz. )','FontSize',10,'Fontname','Arial');

subplot(2,1,2)
plot(frec(1:N/2),Phh(1:N/2),'r','LineWidth',1.5)
axis([0 f1*frecuencia/100 0 ymayor3]);
titulo22=sprintf('ESPECTRO de POTENCIA de la ENVOLVENTE');
title(titulo22,'FontSize',11,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('FRECUENCIA (Hz.)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
ylabel('PSD ( V ^2 / Hz. )','FontSize',11,'Fontname','Arial');
% -----
% BOTON "GUARDAR DATOS" LLEVA A LA VENTANA QUE TE PERMITE GUARDAR LOS
% DATOS
% -----
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% CARGAR VALORES OBTENIDOS

load frecuencia
load N
load vibracion

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una
% frecuencia de muestreo "frecuencia"

incre=1/frecuencia; % segundos
T = N*incre;
t=incre:incre:T;

matriz=[t; vibracion];

[filename, pathname, filterindex] = uiputfile( ...
{'*.txt','Documento de texto (*.txt)';...
'*.m','M-files (*.m)';...
'*.mat','MAT-files (*.mat)';...
'*. *','All Files (*.*)'},...
'Guardar como');

tline=[pathname filename];
fid = fopen(tline,'w');
fprintf(fid,'%10.7e %20.7e\n',matriz);
fclose(fid)

save tline tline
```



```
% -----  
% BOTON "OTROS ANALISIS" LLEVA A LA VENTANA PARA PODER HACER ANÁLISIS  
%GRÁFICO O ESTADÍSTICO  
% -----  
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
RESULTADOS1  
  
% -----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
% -----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(APLICAR_DEF_INT)
```

6.1.25. Elemento rodante

Representa la simulación vibratoria causada por un defecto en elemento rodante. Esta simulación se genera a partir de parámetros muy similares a los del subprograma “D_EXTERIOR_otro.m”.

La estructura de la ventana es equivalente a la descrita para “D_EXTERIOR_otro.fig” en el apartado “6.1.21. Anillo exterior”. Consta de cuadros de texto editables en los que hay que introducir una serie de parámetros, éstos se cargan mediante la opción del botón “APLICAR”. También tiene la opción del botón “ATRÁS” y “SALIR”.

Los ficheros correspondientes a este programa son “D_BOLA_NUEVO.m” y “D_BOLA_NUEVO.fig”.

```
% -----  
% A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO  
% -----  
function varargout = edit1_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% A.2. NUMERO DE PUNTOS  
% -----  
function varargout = edit2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.1. VELOCIDAD DE GIRO EN R.P.M.  
% -----  
function varargout = edit28_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.1. VELOCIDAD DE GIRO EN Hz  
% -----  
function edit29_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit29_Callback(hObject, eventdata, handles)
```



```
% -----  
% B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit17_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA  
% -----  
function varargout = edit18_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD  
% -----  
function edit30_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit30_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.1. AMPLITUD DE VIBRACION POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO  
% -----  
function edit32_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit32_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.2. RUIDO ALEATORIO  
% -----  
function edit42_Callback(hObject, eventdata, handles)  
function edit42_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.3. AMPLITUD GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO  
% -----  
function edit43_Callback(hObject, eventdata, handles)  
function edit43_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.4. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA POR CARGA SOBRE EL ELEMENTO  
% RODANTE  
% -----  
function edit38_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit38_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.5. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA POR VELOCIDAD SOBRE EL ELEMENTO  
% RODANTE  
% -----  
function edit33_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit33_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.5.6. AMPLITUD DE VIBRACION MAXIMA SOBRE UN ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function edit39_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit39_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit14_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
```

```
% -----  
% B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO (°)  
% -----  
function edit31_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit31_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES  
% -----  
function varargout = edit5_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function varargout = edit6_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit7_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO  
% -----  
function varargout = edit8_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA EXTERIOR  
% -----  
function varargout = edit13_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
% -----  
% D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR  
% -----  
function edit34_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit34_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR  
% -----  
function edit35_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit35_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE  
% -----  
function edit36_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit36_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----  
% D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL  
% -----  
function edit37_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
function edit37_Callback(hObject, eventdata, handles)  
% -----
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% -----  
% BOTON "ATRAS" PARA VOLVER A LA VENTANA ANTERIOR LLAMADA  
% RODAMIENTOS  
% -----  
function varargout = pushbutton2_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
  
EXAMINAR2  
close(D_BOLA_NUEVO)  
  
% -----  
% BOTON "APLICAR" PARA HACER EFECTIVOS LOS CAMBIOS EN LOS CUADROS DE  
% TEXTO DE LA VENTANA  
% -----  
function varargout = pushbutton3_Callback(h, eventdata, handles, varargin)  
  
% DATOS DIRECTOS  
  
% DATOS DE LA MUESTRA  
  
frecuencia = str2double(get(handles.edit1,'string'));  
N = str2double(get(handles.edit2,'string'));  
  
% DATOS DEL RODAMIENTO  
% Z = Número de elementos rodantes  
% Dbr = Diámetro del elemento rodante  
% Dm = Diámetro medio del rodamiento  
%  $Dm = 1/2 * (D. \text{ del hueco} + D. \text{ exterior})$   
%  $Dm = 1/2 * (Dci + Dce)$   
% Dci = Diámetro de la circunferencia de contacto interior  
% Dce = Diámetro de la circunferencia de contacto exterior  
% ang_contacto = Angulo de contacto  
  
Z = str2double(get(handles.edit5,'string'));  
Dbr = str2double(get(handles.edit6,'string'));  
Dm = str2double(get(handles.edit7,'string'));  
ang_contacto = str2double(get(handles.edit8,'string'));  
  
% defecto = tamaño efectivo del defecto (en milímetros)  
  
defecto = str2double(get(handles.edit13,'string'));  
  
% zona = factor de carga del rodamiento con fallo  
  
zona = str2double(get(handles.edit14,'string'));  
  
% f0 = frecuencia natural del sistema  
% Xi = relación de amortiguamiento del sistema  
  
Xi = str2double(get(handles.edit17,'string'));  
f0 = str2double(get(handles.edit18,'string'));
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

% v1 = Velocidad de giro del anillo interior (para anillo exterior fijo)
% beta = Influencia de la velocidad de giro y las fuerzas centrífugas en la amplitud de
%vibración

```
v1 = str2double(get(handles.edit28,'string'));  
beta = str2double(get(handles.edit30,'string'));
```

% Ai = Amplitud debida a la carga, sin compensar, a su paso por el defecto (carga radial).
% Este valor expresaría la relación entre la carga total aplicada sobre el rodamiento y la
%vibración registrada (medidas realizadas con un acelerómetro y cuya amplificación vendrá
%establecida por un previo acondicionador de la señal vibratoria. Sus unidades podrían ser
%voltios, decibelios u otro tipo unidad en la cual pueda ser expresada la amplitud de la
%vibración registrada.

```
Ai = str2double(get(handles.edit32,'string'));
```

% DATOS DEL RUIDO ALEATORIO
% A_def_bola = Amplitud del ruido aleatorio

```
A_def_bola = str2double(get(handles.edit42,'string'));
```

% DATOS DEL DESEQUILIBRIO
% A_gen_dese_bola = Amplitud generada por el desequilibrio

```
A_gen_dese_bola = str2double(get(handles.edit43,'string'));
```

%CALCULOS INTERMEDIOS

```
if zona > 1  
    zona_ang=360; % 0  
else zona_ang=180+2*360/(2*pi)*asin(2*zona-1); % 0  
end;
```

% f1 = Frecuencia de giro del anillo interior (para anillo exterior fijo)
% A1 = Amplitud debida a la velocidad de giro y a las fuerzas centrífugas

```
f1=v1/60;  
A1=Ai*f1*beta;
```

% BPFI = Frecuencia de paso por un defecto en la pista interior de un rodamiento
% BPFO = Frecuencia de paso por un defecto en la pista exterior de un rodamiento
% 2 * BSF = Frecuencia de paso por un defecto en un elemento rodante de un rodamiento
% FTF = Frecuencia del tren fundamental de un rodamiento (Frecuencia de giro de la jaula)

```
BPFI=1/2*Z*f1*(1+Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi)); % Hz  
BPFO=1/2*Z*f1*(1-Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi)); % Hz  
BSF=[1/2*f1*(Dm/Dbr)*(1-(Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi))^2)]; % Hz  
FTF=1/2*f1*(1-Dbr/Dm*cos(ang_contacto/180*pi)); % Hz
```

% F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE

```
D23=2*BSF;
```

272

“Evolución de una aplicación informática para el análisis y simulación de vibraciones.
ADEVI3.1”

Daniela Vicario Tomaselli



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

% En esta simulación se establecerá la carga máxima que soporta el elemento más cargado
% en función de la carga radial ($Fr = A_i$) que actúa sobre el rodamiento

$Fr = A_i$;

% Generación de la curva de la integral de distribución de carga en función del factor de carga

$T_{\text{zona}} = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12.5, 16.7, 25, 50] * 0.1$;

$T_{\text{Jr}} = [1/Z \ 0.1156 \ 0.1590 \ 0.1892 \ 0.2117 \ 0.2288 \ 0.2416 \ 0.2505 \ 0.2559 \ 0.2576 \ 0.2546 \ 0.2289$
 $0.1871 \ 0.1339 \ 0.0711]$;

% H = Grado del polinomio de ajuste

$H = 6$;

$[valor, error] = \text{polyfit}(T_{\text{zona}}, T_{\text{Jr}}, H)$;

$Jr = \text{polyval}(valor, zona)$;

% $Q_{\text{total}} = Fr / \cos(\text{ang_contacto})$

% Luego, como se ha visto con anterioridad:

% $Q_{\text{max_ele}} = Fr / [Jr * Z * \cos(\text{ang_contacto})]$

$Q_{\text{max_ele}} = Fr / [Jr * Z * \cos(\text{ang_contacto}/180 * \pi)]$;

% MAXIMA AMPLITUD DE VIBRACION SOBRE ELEMENTO RODANTE

$B54 = Q_{\text{max_ele}} + A1$;

% ESTE PROGRAMA GENERA UNA SEÑAL TEMPORAL SIMULANDO LA EMITIDA POR
% UN RODAMIENTO CON FALLO EN SU ELEMENTO RODANTE CONSIDERANDO
% DIFERENTES PARAMETROS

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una
% frecuencia de muestreo "frecuencia"

$inc = 1/frecuencia$; % segundos

$T = N * inc$;

$t = inc : inc : T$;

$inc_f = frecuencia/N$; % Hz

$frec = 0 : inc_f : frecuencia - inc_f$;

% DATOS DEL RODAMIENTO

% D_{ci} = Diámetro de la circunferencia de contacto interior

% D_{ce} = Diámetro de la circunferencia de contacto exterior

$D_{ci} = D_m - D_{br} * \cos(\text{ang_contacto}/180 * \pi)$; % mm

$D_{ce} = D_m + D_{br} * \cos(\text{ang_contacto}/180 * \pi)$; % mm

$f_i = 2 * BSF$;

$f_j = FTF$;



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% alpha = amortiguamiento del sistema

alpha=Xi*f0;

% k = variable adimensional que indica el número de puntos del impacto
k=floor(1/(20*incre))+1;

% m = número de puntos por cada giro completo de la jaula
m=floor(1/(incre*fj))+1;

% b = número de puntos entre cada defecto en la pista interior del rodamiento
b=floor(1/(incre*fi))+1;

% n = número de puntos de la zona cargada
n=floor(m*zona)+1;

% Generación de una señal resultado de la interaccion de dos impactos, con cierto retraso de
%uno respecto al otro
%
% tita = ángulo que abarca el defecto en el elemento rodante
% wi = velocidad angular del elemento rodante
% wj = velocidad angular de la jaula
%
tita = 2 * defecto / Dbr;          % (rad)
wi = 2 * pi * (1/2 * fi);         % (rad/s)
wj = 2 * pi * fj;                 % (rad/s)

% retardo = tiempo, en segundos, que transcurre entre el primer y el segundo impacto en el
%defecto
retardo = tita / wi;              % (s)

% kj = número de puntos del retardo
kj=floor(retardo/incre)+1;
retardo=kj*incre;                % puntos

%+++++
%
% La carga máxima que soporta el elemento más cargado de un rodamiento de bolas, en el
%cual actúan combinadamente cargas radiales y axiales, puede expresarse de dos formas:
%
%  $Q_{max\_ele} = Fr / [J_r * Z * \cos(ang\_contacto)]$ 
%
%  $Q_{max\_ele} = Fa / [J_a * Z * \sin(ang\_contacto)]$ 
%
% donde:
% Fr = Carga radial
% Fa = Carga axial
% Z = Número de elementos rodantes
% ang_contacto = Angulo de contacto
% Jr = Es la integral de distribución de carga radial y viene expresada en función del factor
%de carga.
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
% Ja = Es la integral de distribución de carga axial y viene expresada en función del factor
%de carga.
% zona = Es el factor de carga
% GI = Semi-ángulo abarcado por la zona de carga
%
%      zona= 1/2 * [1-cos(GI)]
%
% NOTA- Se supone que la carga combinada está cercana a la igualdad:
%
%      Fr / Fa = tang(ang_contacto)
%
%+++++

%+++++
%
% En esta simulación se establecerá la carga máxima que soporta el elemento más cargado
%en función de la carga radial (Fr = Ai) que actúa sobre el rodamiento
% Así:
%
%      Q_total = Fr / cos(ang_contacto)
%
% Luego, como se ha visto con anterioridad:
%
%      Q_max_ele = Fr / [ Jr * Z * cos(ang_contacto)]
%
%+++++

% Generación de la señal de modulación de amplitud considerando el efecto de la velocidad
%de giro y de la distribución de carga
% bueno = señal resultante de la zona de carga parcial
bueno=zeros(size(t));
for r=1:m:N
    for s=(floor(m/2)+1):1:m
        if (1-(1/(2*zona))*(1-cos(2*pi*fj*t(s-floor(m/2))))) >= 0
            bueno(r+s-1)=A1+Q_max_ele*abs((1-(1/(2*zona))*(1-cos(2*pi*fj*t(s-floor(m/2)))))^(1.5));
        else
            bueno(r+s-1)=0;
        end;
    end;
    for s=1:1:(floor(m/2))
        bueno(r+s-1)=bueno(r+m-s);
    end;
end;

% Generación de una señal similar a la emitida por un rodamiento con un elemento rodante
%dañado, considerando:
%      · Dos impactos:
%          * Uno de entrada en el defecto.
%          * Otro de salida del defecto.
%      · Un rodamiento de contacto angular que soporta una carga combinada radial-axial,
%donde se extrae la amplitud del valor de la carga radial.
%      · El efecto derivado de la velocidad de giro.
%      · La modulación de amplitud inducida por la zona de carga.
```

```
impulso=zeros(size(t));
for r=1:b:N
    s=1;
    if (r+k+kj)<= N
        if bueno(r+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=A1;
        end;
        for s=1:k
            g1(s)=Af*exp(-alpha*s*incre)*sin(2*pi*f0*s*incre);
        end;
        for s=(k+1):(k+kj)
            g1(s)=0;
        end;

        for s=1:kj
            g2(s)=0;
        end;
        if bueno(r+kj+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=A1;
        end;
        for s=(kj+1):(kj+k)
            g2(s)=Af*exp(-alpha*(s-kj)*incre)*sin(2*pi*f0*(s-kj)*incre);
        end;
        gx=g1-g2;
        for s=1:(k+kj)
            impulso(r+s)=impulso(r+s)+gx(s);
        end;
    else
        if bueno(r+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=A1;
        end;
        for s=1:(N-r)
            g1(s)=Af*exp(-alpha*s*incre)*sin(2*pi*f0*s*incre);
        end;
        for s=1:kj
            g2(s)=0;
        end;
        if bueno(r+kj+1) > 0
            Af=bueno(r);
        else
            Af=A1;
        end;
        for s=(kj+1):(N-r)
            g2(s)=Af*exp(-alpha*(s-kj)*incre)*sin(2*pi*f0*(s-kj)*incre);
        end;
        gx=g1-g2;
```



```
for s=1:(N-r)
    impulso(r+s)=impulso(r+s)+gx(s);
end;
end;
end;

gh=impulso;

% RUIDO ALEATORIO
amra = (A_def_bola)/3;
longi = length(gh);
ra=random('normal',0,amra,1,longi);

% DESEQUILIBRIO
for s=1:longi
    dese(s)= (A_gen_dese_bola)*sin(2*pi*f1*s*incre);
end;

gh = gh+ra+dese;

vibracion=gh;
n=length(vibracion);

% SALVAR VARIABLES

save frecuencia frecuencia -ascii
save N N -ascii
save A1 A1 -ascii
save f1 f1 -ascii
save Z Z -ascii
save Dbr Dbr -ascii
save Dm Dm -ascii
save ang_contacto ang_contacto -ascii
save Ai Ai -ascii
save defecto defecto -ascii
save zona zona -ascii
save f0 f0 -ascii
save Xi Xi -ascii
save v1 v1 -ascii
save BPFO BPFO -ascii
save FTF FTF -ascii
save BSF BSF -ascii
save BPFI BPFI -ascii
save zona_ang zona_ang -ascii
save Q_max_ele Q_max_ele -ascii
save A_def_bola A_def_bola -ascii
save A_gen_dese_bola A_gen_dese_bola -ascii
save vibracion vibracion -ascii
save n n -ascii
save bueno bueno -ascii
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

% SE ESPECIFICA EL NÚMERO DE DECIMALES QUE SE QUIERE EN LAS SIGUIENTES
%VARIABLES

```
zona_ang=num2str(zona_ang,'%0.2f');  
A1=num2str(A1,'%0.4f');  
BPFI=num2str(BPFI,'%0.2f');  
BPFO=num2str(BPFO,'%0.2f');  
FTF=num2str(FTF,'%0.2f');  
D23=num2str(D23,'%0.2f');  
Q_max_ele=num2str(Q_max_ele,'%0.4f');  
B54=num2str(B54,'%0.4f');
```

% DATOS DEPENDIENTES (RESULTADO DE OTROS)

```
set(handles.edit29,'string',f1)  
set(handles.edit31,'string',zona_ang)  
set(handles.edit33,'string',A1)  
set(handles.edit34,'string',BPFI)  
set(handles.edit35,'string',BPFO)  
set(handles.edit36,'string',D23)  
set(handles.edit37,'string',FTF)  
set(handles.edit38,'string',Q_max_ele)  
set(handles.edit39,'string',B54)
```

APLICAR_DEF_BOLA

```
% -----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
% -----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(D_BOLA_NUEVO)
```

6.1.26. Información sobre elemento rodante

Está programado igual que el “6.1.22. Información sobre anillo exterior”, pero se llama este subprograma “APLICAR_DEF_BOLA.fig” y su fichero asociado “APLICAR_DEF_BOLA.m”.

```
% -----  
% BOTON "GRAFICAS" PARA VISUALIZAR LOS RESULTADOS GRAFICOS  
% -----  
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

% CARGAR VALORES OBTENIDOS

```
load frecuencia  
load N  
load f1  
load defecto  
load v1
```

278

“Evolución de una aplicación informática para el análisis y simulación de vibraciones.
ADEVI3.1”

Daniela Vicario Tomaselli

```
load zona_ang
load vibracion
load bueno

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una
%frecuencia de muestreo "frecuencia"

incre=1/frecuencia; % segundos
T = N*incre;
t=incre:incre:T;

incre_f=frecuencia/N; % Hz
frec=0:incre_f:frecuencia-incre_f;

% Se genera la señal temporal
gh=vibracion;

% Calculo del ESPECTRO DE POTENCIA de un rodamiento con defecto en un elemento
%rodante
Yi=fft(gh,N);
Pii=Yi.*conj(Yi)*incre/(N/2);

% POTENCIA ESPECTRAL de la señal
Potii=incre_f*sum(Pii(1:N/2));

% Calculo de la ENVOLVENTE de la señal temporal de un rodamiento con defecto en un
%elemento rodante
Hi=hilbert(gh);
envolvei=abs(Hi);

% Calculo del ESPECTRO DE POTENCIA de la ENVOLVENTE
kai=fft(envolvei,N);
Phh=kai.*conj(kai)*incre/(N/2);

% POTENCIA ESPECTRAL de la ENVOLVENTE
Pothh=incre_f*sum(Phh(1:N/2));

figure(1)
% Figura 1ª:
% línea azul= señal temporal como la emitida por un rodamiento con un elemento rodante
% dañado, considerando la modulación de amplitud, el efecto de la velocidad de giro y la zona
%de carga
% línea roja= envolvente de la zona de carga
%
% Figura 2ª:
% línea azul= detalle de la señal temporal del rodamiento con defecto en un elemento
%rodante
% línea roja= envolvente de la señal anterior calculada como el valor absoluto de la
%transformada de Hilbert
ymayor1=1.1*max(max(abs(gh(1:N/2))),max(abs(bueno(1:1:N/2))));
ymayor2=1.1*max(max(abs(gh(1:round(1/(f1*incre))))),max(envolvei(1:round(1/(f1*incre)))));
```

```
subplot(2,1,1)
plot(t,gh,'b','LineWidth',1.5);
titulo=sprintf('SIMULACION de la SEÑAL TEMPORAL emitida por un RODAMIENTO con
DEFECTO en ELEMENTO RODANTE \n Velocidad de giro = %4.0f r.p.m.    Zona de Carga =
%5.2fº    Tamaño del defecto = %2.2f mm.',v1,zona_ang,defecto);
axis([0 0.5 -ymayor1 ymayor1]);
title(titulo,'FontSize',8,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('TIEMPO (s)','FontSize',8,'Fontname','Arial');
ylabel('AMPLITUD (V)','FontSize',8,'Fontname','Arial');
hold on;
plot(t(1:N),bueno(1:N),'r','LineWidth',1)
hold off;

subplot(2,1,2)
plot(t,gh,'b','LineWidth',1.5)
titulo1=sprintf('DETALLE de la SEÑAL TEMPORAL SIMULADA y la ENVOLVENTE');
axis([0 1/f1 -ymayor12 ymayor12]);
title(titulo1,'FontSize',11,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('TIEMPO (s)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
ylabel('AMPLITUD (V)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
hold on
plot(t,envolvei,'r','LineWidth',1)
hold off

datos=[t gh'];
save sim_def_bola.txt datos -ascii -TABS;
tline='C:\ADEV13.1\sim_def_bola.txt';
save tline tline

figure(2)
% Figura 1ª= Espectro de Potencia de la señal anterior
% Figura 2ª= Espectro de Potencia de la Envolvente
ymayor2=1.1*max(Pii(3:N/2));
ymayor3=1.1*max(Phh(3:N/2));

subplot(2,1,1)
plot(frec(1:N/2),Pii(1:N/2),'b','LineWidth',1.5)
axis([0 frecuencia/2 0 ymayor2]);
titulo21=sprintf('ESPECTRO de POTENCIA de un RODAMIENTO con DEFECTO en
ELEMENTO RODANTE \n POTENCIA ESPECTRAL TOTAL = %1.6f',Potii);
title(titulo21,'FontSize',10,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('FRECUENCIA (Hz.)','FontSize',10,'Fontname','Arial');
ylabel('PSD ( V ^2 / Hz. )','FontSize',10,'Fontname','Arial');
```



Capítulo III: DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DE LA APLICACIÓN

```
subplot(2,1,2)
plot(frec(1:N/2),Phh(1:N/2),'r','LineWidth',1.5)
axis([0 f1*frecuencia/100 0 ymayor3]);
titulo22=sprintf('ESPECTRO de POTENCIA de la ENVOLVENTE');
title(titulo22,'FontSize',11,'Fontname','Arial');
grid
xlabel('FRECUENCIA (Hz.)','FontSize',11,'Fontname','Arial');
ylabel('PSD ( V ^2 / Hz. )','FontSize',11,'Fontname','Arial');

% -----
% BOTON "GUARDAR DATOS" LLEVA A LA VENTANA QUE TE PERMITE GUARDAR LOS
% DATOS
% -----
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)

% CARGAR VALORES OBTENIDOS

load frecuencia
load N
load vibracion

% Se genera el vector "t" emulando una señal temporal de "T" segundos, con una
% frecuencia de muestreo "frecuencia"

incre=1/frecuencia; % segundos
T = N*incre;
t=incre:incre:T;

matriz=[t; vibracion];

[filename, pathname, filterindex] = uiputfile( ...
{'.txt','Documento de texto (*.txt)';...
'.m','M-files (*.m)';...
'.mat','MAT-files (*.mat)';...
'*.*','All Files (*.*)'},...
'Guardar como');

tline=[pathname filename];
fid = fopen(tline,'w');
fprintf(fid,'%10.7e %20.7e\n',matriz);
fclose(fid)

save tline tline

% -----
% BOTON "OTROS ANALISIS" LLEVA A LA VENTANA PARA PODER HACER ANÁLISIS
% GRÁFICO O ESTADÍSTICO
% -----
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)

RESULTADOS1
```



```
% -----  
%BOTON "SALIR" CIERRA LA VENTANA ACTIVA Y SALE DE LA APLICACION  
% -----  
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
close(APLICAR_DEF_BOLA)
```

6.2. ADEVI3.1 en inglés

Las líneas de código son iguales para la versión inglesa, salvo cuando se llama a otro subprograma. En este caso se usa la denominación en inglés. Los mensajes de aviso, error, aparecen en inglés. Por eso, en este capítulo para ADEVI3.1 versión en inglés se pone el diagrama (Figura 3.14.a, b,c, d, e y f) puesto que es una manera muy sencilla de ver cuál es la denominación inglesa de los programas y subprogramas.

Capítulo IV:

MANUAL DEL USUARIO



IV. MANUAL DEL USUARIO

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

La aplicación ADEVI 3.1 (Análisis DE Vibraciones) que a continuación se describe en este manual está diseñado para:

- El análisis de vibraciones de datos tomados en ensayos realizados en un sistema mecánico.
- Simulación de vibraciones a través de los defectos en diferentes partes de los rodamientos.

La primera utilidad persigue que a partir de los datos de vibración tomados en un ensayo sea posible analizar la señal temporal y de manera más extensa la frecuencial por diferentes métodos tales como la Transformada de Fourier (FFT), envolvente, Transformada de Hilbert y Transformada Wavelet.

Esta aplicación permite el análisis y la simulación de una señal vibratoria de manera rápida e intuitiva sirviéndose de gráficas y resultados complementarios. Por otro lado, contiene un módulo de análisis estadístico que permite precisar mejor la muestra que se va a analizar.

Una ventaja conseguida es la integración de las ventanas como parte del programa, lo que permite un seguimiento visual y mayor facilidad de manejo para el usuario. Además, muestra diferentes tipos de resultados gráficos, comparaciones entre ensayos y, sobre todo, el almacenamiento de los resultados gráficos obtenidos para posterior tratamiento.

En el caso de los rodamientos ocurre algo muy similar, la aplicación simula casos de defectos en los rodamientos en diferentes zonas (anillo exterior, interior y elemento rodante) partiendo de una serie de parámetros, mediante los cuales se realiza un análisis vibratorio.



2. REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Los datos de partida son esenciales para un correcto uso y funcionamiento de ADEVI 3.1.

Para poder ejecutar de forma correcta el módulo de análisis de vibraciones mediante un fichero de datos es necesario conocer y tener claro los siguientes puntos.

1. Fichero que contenga los datos de un ensayo de vibraciones realizado.

El formato de este fichero será siempre de al menos una columna en la que se reflejarán las medidas de vibración realizadas durante el ensayo. Si el fichero constara de más de una columna el programa pedirá que se identifique el significado de cada una de ellas, mediante un cuadro de diálogo, al comenzar la aplicación. Más adelante, se explica en detalle.

2. Ubicación del fichero de datos de la señal.

Hay que tener en cuenta que la lectura de datos desde la aplicación se puede realizar tanto desde discos internos del ordenador como desde unidades externas, como pueden ser los CDROM, los DISQUETES o los dispositivos de USB, es decir, cualquier ubicación posible en el PC.

3. Frecuencia de muestreo de la señal de vibración del ensayo.

En el caso de simulación de vibraciones generadas por defectos en rodamientos se parte de un rodamiento del cual se deben conocer una serie de parámetros con los que la aplicación simula el defecto tanto en pista exterior, como en pista interior o elemento rodante. Estos parámetros se dividen en cuatro grupos fundamentales que son:

1. Características de la muestra.
 2. Características del sistema.
 3. Características del rodamiento.
 4. Características del defecto.
4. Que la resolución de pantalla del ordenador sea como mínimo de 1024 por 768 pixels, porque hay algunas ventanas que son bastantes grandes y sin esa resolución se perdería información.

3. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

Para comenzar a utilizar la aplicación ADEVI 3.1 es necesario tener abierta una sesión de MATLAB 7.0 en el PC. Esta aplicación es compatible con cualquier sistema operativo que soporte la versión 7.0 de MATLAB ya que la aplicación se ha elaborado en este programa.

La aplicación se ubica en un directorio compuesto por todos los subprogramas ejecutables que la componen. MATLAB trabaja con rutas predefinidas. Si la aplicación y todos sus ejecutables no forman parte de este “path” predefinido por MATLAB es necesario seleccionar el directorio donde se encuentran los ficheros “.m” de la aplicación como “Current Directory” o añadir la ruta en las predefinidas por MATLAB para que puedan ser reconocidos por la aplicación.

Una vez tomadas estas precauciones para iniciar la aplicación hay que teclear en el “prompt” (puntero), “>>”, de MATLAB la orden “portadainicio”.

3.1. ADEVI3.1 en castellano

3.1.1. Portadainicio

La aplicación comienza al ejecutar el archivo de inicio “PORTADAINICIO.m” mediante el cual aparecerá una pantalla en la que se muestra la presentación de la aplicación y sólo consiste en dos acciones: SALIR y CONTINUAR. Figura 4.1.

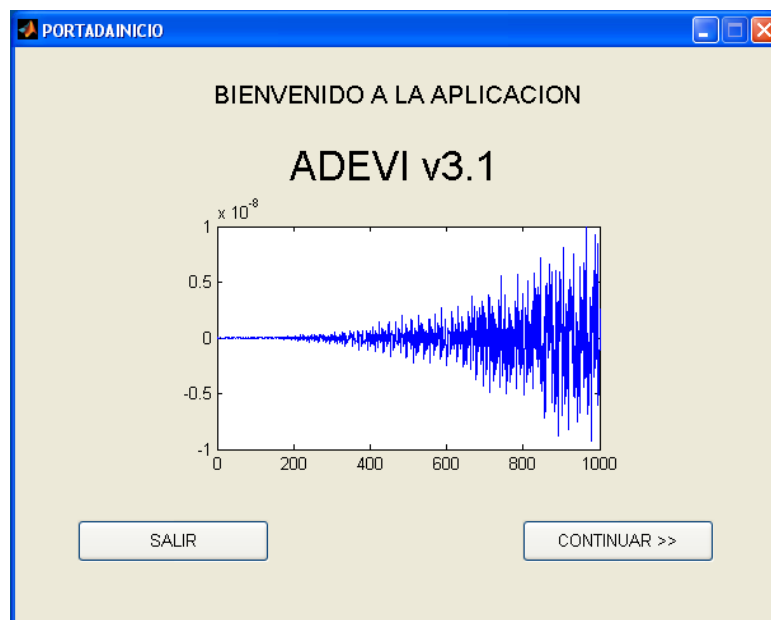


Figura 4.1. Pantalla de inicio de la aplicación.

Si se pulsa el botón “CONTINUAR” la pantalla de inicio cambia su aspecto y presenta las dos opciones principales de la aplicación que se han explicado anteriormente en la pantalla llamada PORTADA.

3.1.2. Portada

Es realmente la primera pantalla de la aplicación, ya que la anterior sólo era una presentación.

Por un lado, se encuentra un botón llamado “ANÁLISIS DE FICHEROS DE DATOS DE VIBRACIONES” que da paso a la parte de la aplicación encargada de analizar una señal de vibración de un ensayo dado mediante gráficas y resultados.

Por otro lado, está el botón llamado “SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS” que permite entrar en el otro módulo de la aplicación que realiza una simulación de vibraciones por defectos en rodamientos a partir de unos parámetros dados. La pantalla es igual a la mostrada en la Figura 4.2.

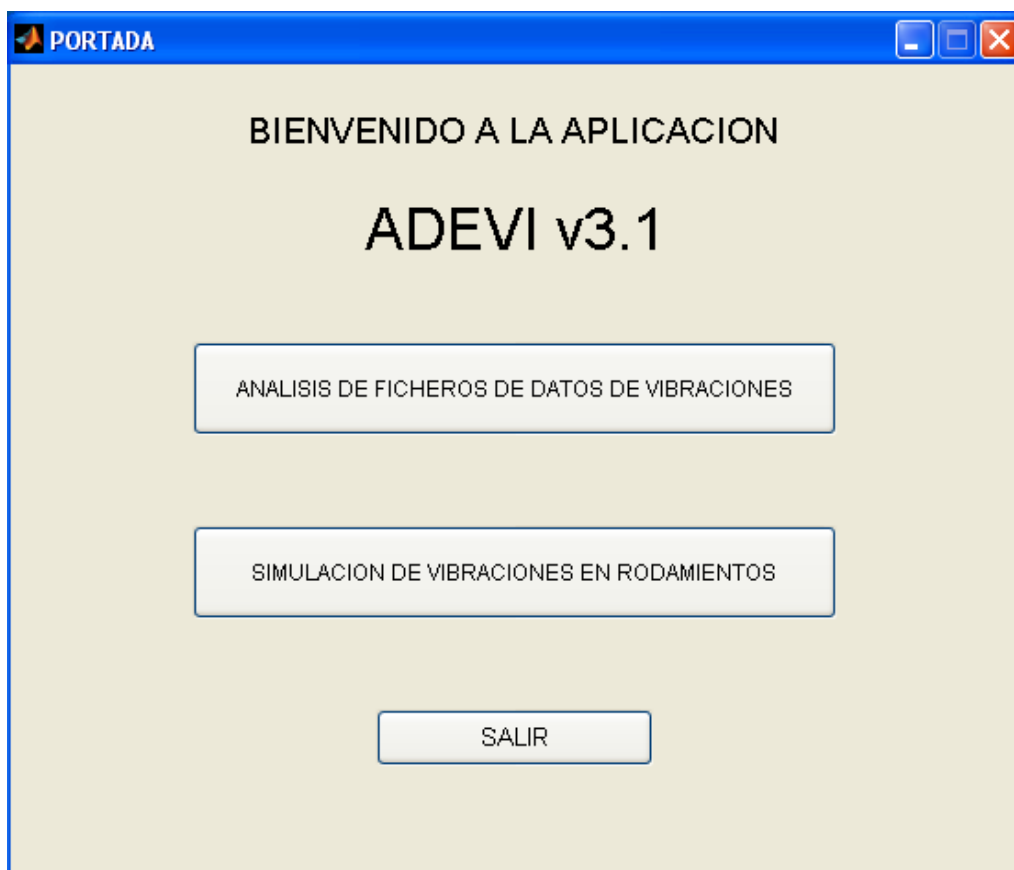


Figura 4.2. Pantalla inicial de la aplicación ADEVI 3.1.

3.1.3. Análisis de vibraciones

OBTENCIÓN DE DATOS PARA ANALIZAR

Una vez iniciada la aplicación para comenzar a utilizar el módulo de análisis de vibraciones se pulsa el botón correspondiente llamado “ANÁLISIS DE FICHEROS DE DATOS DE VIBRACIONES” y aparece la primera ventana propia de este módulo. Figura 4.3.

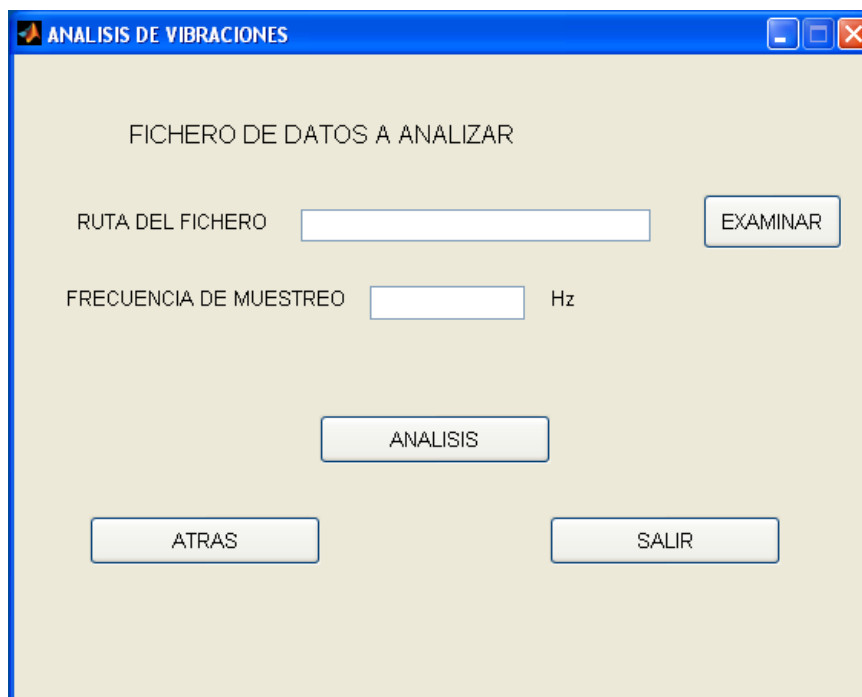


Figura 4.3. Pantalla inicial del programa de análisis de vibraciones.

ENTRADA DE DATOS

Esta ventana es la que se encarga de la captación de los datos necesarios para el análisis de la señal. Los dos datos que necesita la aplicación son los siguientes:

- A. *Ruta del fichero.* La ruta del fichero se rellena mediante el botón “EXAMINAR” que se explica a continuación.
- B. *Frecuencia de muestreo.* La frecuencia de muestreo tiene que ser un dato conocido por el usuario y se introduce por teclado en el cuadro correspondiente.

Para introducir la ruta donde se encuentra el fichero de la señal a analizar se recurre al botón “EXAMINAR” que permite una búsqueda del fichero en todas las ubicaciones posibles del PC.

Esto se hace así para evitar las posibles equivocaciones que pueden existir si se introduce este dato directamente por teclado, puede escribirse de forma incorrecta o puede escribirse un fichero que no existe.

Al pulsar el botón “EXAMINAR” se accede a una ventana intermedia (“BUSCADOR”) que contiene a su vez otro botón llamado “Buscar...” y un cuadro de texto que en principio se encuentra en blanco. Figura 4.4.

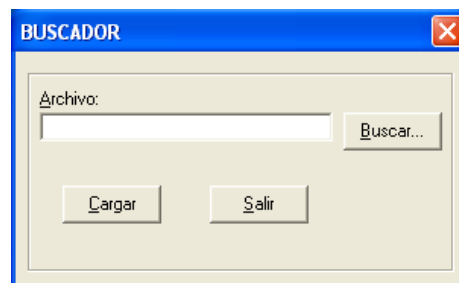


Figura 4.4. Pantalla intermedia. Selección del fichero a analizar.

Pulsando el botón de “Buscar...” se accede a la ventana típica del Explorador de Windows, en la que se puede seleccionar el archivo que queremos analizar buscando en las diferentes ubicaciones del PC. Figura 4.5.

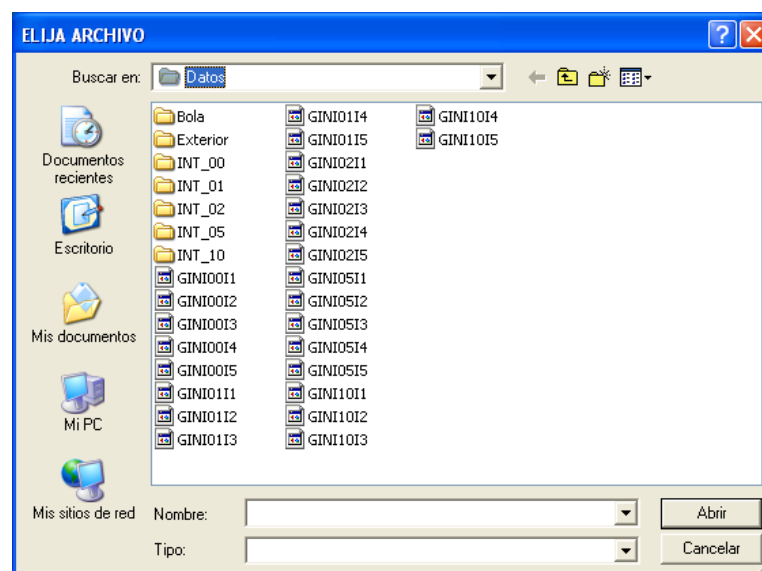


Figura 4.5. Explorador de Windows.

Una vez seleccionado se pulsa “Abrir” y aparece de nuevo la ventana intermedia, pero esta vez con la ruta del archivo en el cuadro de texto, esto permite ver si se ha elegido correctamente el archivo y en caso contrario el programa permite volver a seleccionar otro archivo pulsando de nuevo el botón “Buscar...” antes de continuar con el programa. Seguidamente se graban los datos mediante la tecla “Cargar”.

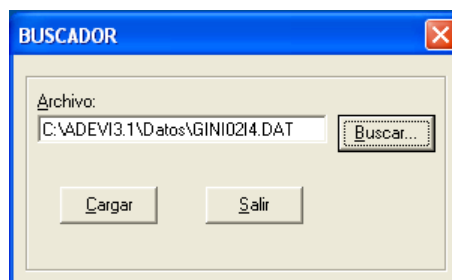


Figura 4.6. Fichero seleccionado.

Si no se quieren grabar los datos del fichero se pulsa “Salir” para cerrar la ventana y se vuelve a la pantalla principal (Figura 4.3.). Cuando se pulsa cargar también se cierra esta ventana intermedia y aparece el dato de la ruta del fichero en el cuadro de texto de la ventana principal (Figura 4.3.).

Si el fichero de datos sólo contiene una columna la aplicación prosigue, pero en el caso de que la aplicación detecte que existe más de una columna en el fichero seleccionado se genera automáticamente una ventana (Figura 4.7.) avisando que el fichero tiene más de una columna. Esta ventana contiene un mensaje de aviso que pide la columna que contiene los datos de vibración. Esto es así porque los ficheros de captación de datos de los ensayos en ocasiones se generan con diferentes columnas que contienen además de la columna con los datos de la señal vibratoria otras columnas con otro tipo de datos como pueden ser el tiempo, el número de orden del dato,... Este es el modo que tiene la aplicación de seleccionar la columna correcta por tanto el usuario debe conocer el fichero que se va a analizar.

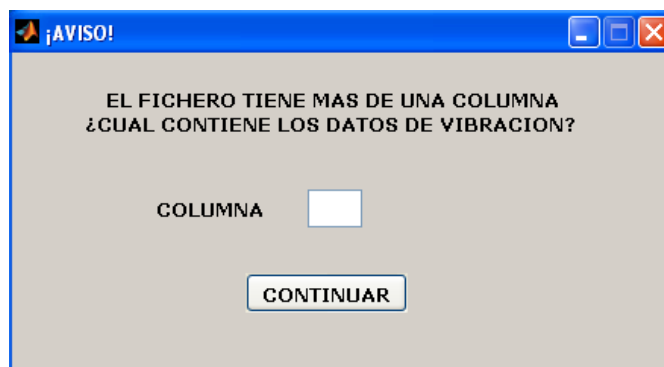


Figura 4.7. Fichero con más de una columna.

Para continuar con el análisis simplemente hay que introducir la columna en la que se encuentran los datos de la señal adquirida en el ensayo.

Si se pulsa el botón “CONTINUAR” sin haber escrito el número de columna el programa lanza un mensaje de error a través de una ventana que avisa de la necesidad de escribir el número de columna. Figura 4.8.

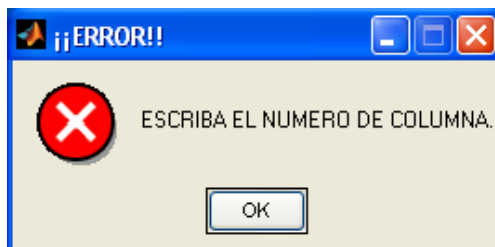


Figura 4.8. Mensaje de error.

Una vez introducido el número de la columna la aplicación chequea que exista ese número de columna, es decir, si se ha introducido en el cuadro de texto un valor de columna superior al número de columnas que contiene el fichero seleccionado. Cuando esto ocurre se lanza otra ventana de aviso que advierte de la situación. Figura 4.9.

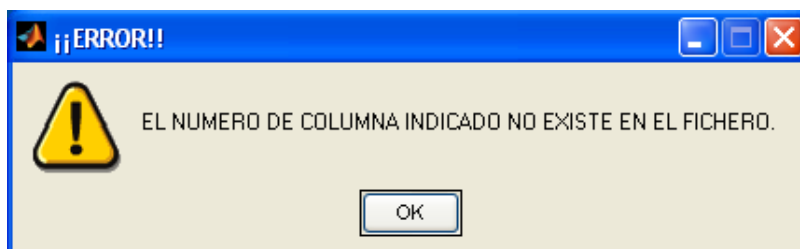


Figura 4.9. Mensaje de aviso.

Si el dato de la columna introducido cumple los requisitos, se cierra la ventana al pulsar el botón “CONTINUAR” y se vuelve a la ventana principal (Figura 4.3.).

El siguiente dato necesario para continuar con el análisis de la señal es la frecuencia de muestreo de la señal que se va a estudiar, simplemente hay que introducir el dato en el cuadro de texto por teclado y en Hz.

Al llegar a este punto, el programa ya dispone de los inputs necesarios para comenzar el análisis, solo habrá que pulsar el botón de “ANÁLISIS” para pasar a la siguiente ventana. Si no se rellena alguno de estos dos datos descritos anteriormente al pulsar el botón de “ANÁLISIS” se dispara una ventana de error que advierte que es necesario introducir todos los datos del análisis. Figura 4.10.

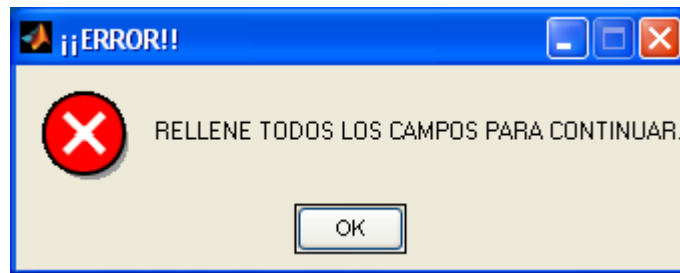


Figura 4.10. Mensaje de error por datos insuficientes.

Una vez rellenados los dos datos necesarios para el análisis la ventana se presenta de una forma similar a la siguiente, Figura 4.11.

Se observa que también tiene las opciones de salir del programa o volver a la pantalla anterior.

La opción representada en el botón llamado “SALIR” termina la aplicación y el botón “ATRÁS” cierra esta ventana y vuelve al inicio de la aplicación (Figura 4.2.).

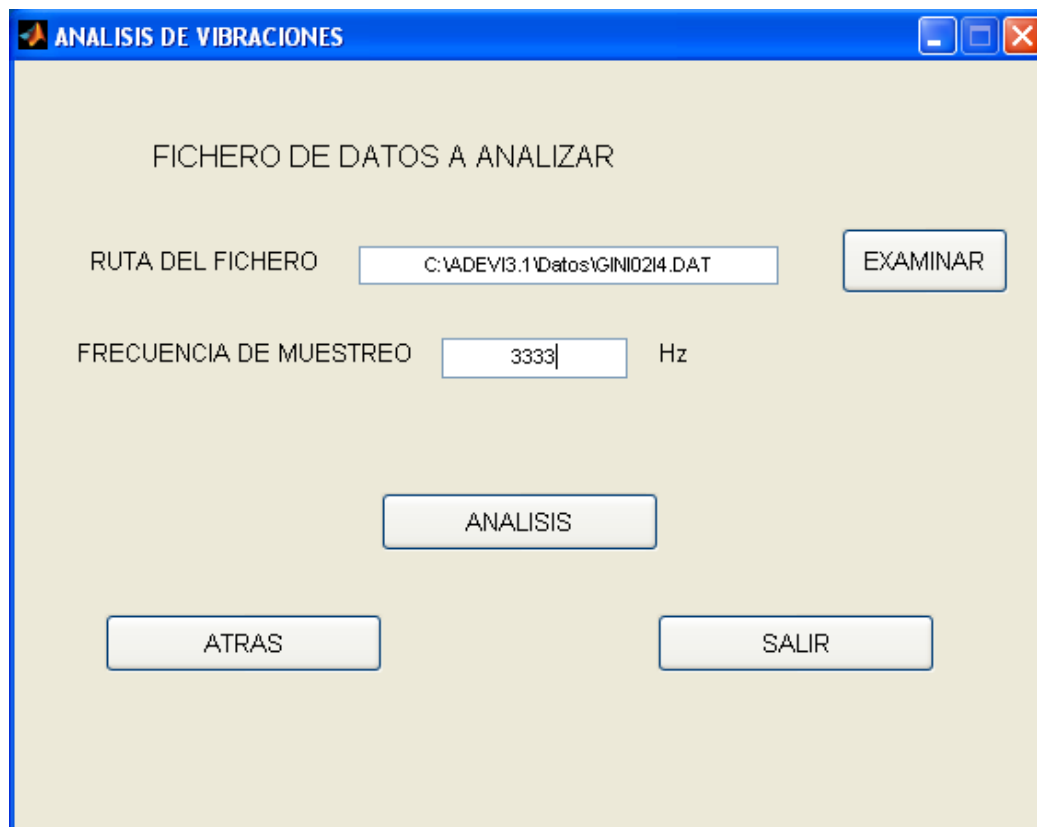


Figura 4.11. Ventana inicial del análisis de vibraciones con datos.

OPCIONES DE ESTUDIO DEL ENSAYO REALIZADO

Cuando la aplicación ya dispone de los datos del análisis, se pasa a la siguiente ventana (Figura 4.12.) que consta de dos opciones principales. Estas dos opciones equivalen a los dos tipos de resultados que la aplicación da para el fichero de datos introducido.

- *Gráficas:* Esta opción permite visualizar los resultados gráficos del análisis de la señal mediante las diferentes gráficas: PSD, Señal Temporal, Envolvente de la señal, Espectro de la Envolvente,... Todas estas gráficas se explican en detalle más adelante.
- *Datos Estadísticos:* Visualiza los datos estadísticos más importantes del ensayo, así como una representación gráfica de un histograma normalizado.

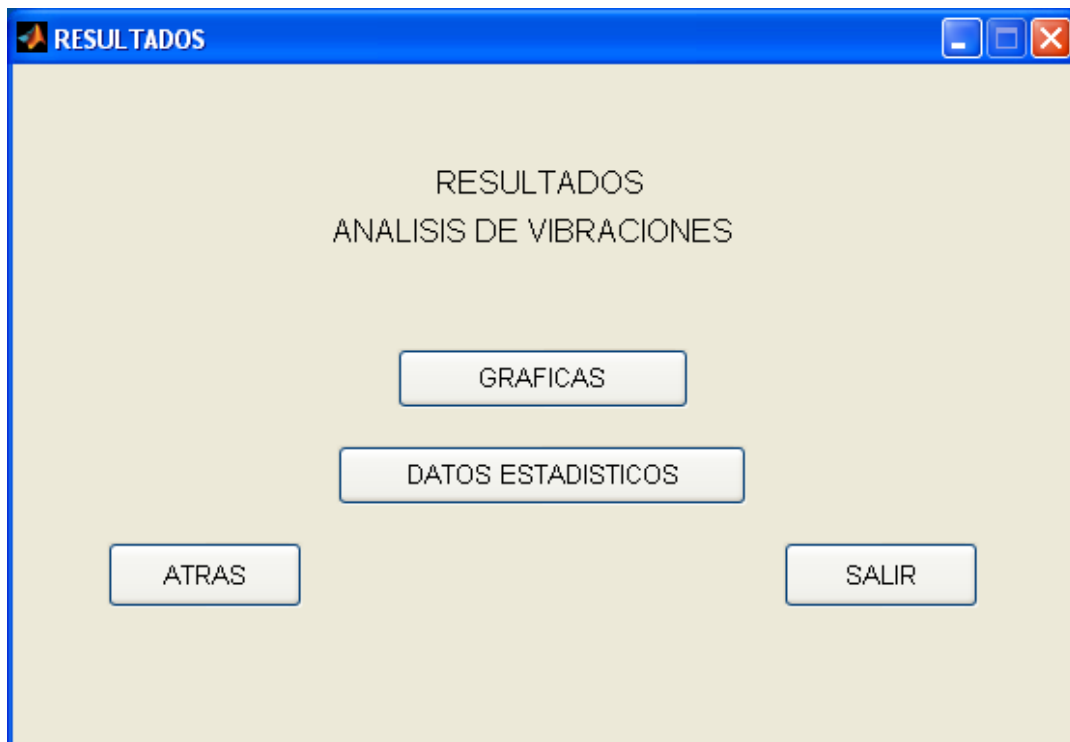


Figura 4.12. Ventana opción de resultados.

DATOS ESTADÍSTICOS

Al elegir esta opción, se abre una ventana en la que con una serie de cuadros de texto en los que, en principio, no aparece ningún dato, el único cuadro de texto editable relleno es el que indica el fichero que se está estudiando. Figura 4.13.



ESTADISTICA

DATOS ESTADISTICOS

C:\ADEV13.1\Datos\GINI024.DAT

VALOR EFICAZ	<input type="text"/>	MEDIANA	<input type="text"/>
VALOR MEDIO	<input type="text"/>	DESVIACION ESTANDAR	<input type="text"/>
VALOR DE PICO	<input type="text"/>	MINIMO	<input type="text"/>
VALOR PICO A PICO	<input type="text"/>	MAXIMO	<input type="text"/>
FACTOR DE FORMA	<input type="text"/>	VARIANZA	<input type="text"/>
FACTOR DE CRESTA	<input type="text"/>	SESGO	<input type="text"/>
MEDIA	<input type="text"/>	KURTOSIS	<input type="text"/>

VER DATOS ESTADISTICOS

HISTOGRAMA NORMALIZADO

SALIR

Figura 4.13. Resumen datos estadísticos del ensayo.

Si se pulsa el botón “SALIR” se cierra esta ventana activa, pero no el programa porque ésta es una rama secundaria del programa principal que sigue activo en la pantalla de la Fig. 4.12.

Al pulsar el botón “VER DATOS ESTADÍSTICOS” se generan los valores de los datos estadísticos representados en los cuadros de texto (media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo,...). Figura 4.14.



ESTADISTICA

DATOS ESTADISTICOS

C:\ADEV13.1\Datos\GINI024.DAT

VALOR EFICAZ	0.166242	MEDIANA	-0.015
VALOR MEDIO	0.115122	DESVIACION ESTANDAR	0.165619
VALOR DE PICO	1.245	MINIMO	-1.245
VALOR PICO A PICO	2.29	MAXIMO	1.045
FACTOR DE FORMA	1.44406	VARIANZA	0.0274295
FACTOR DE CRESTA	7.48907	SESGO	-0.105781
MEDIA	-0.0145047	KURTOSIS	9.13915

VER DATOS ESTADISTICOS

HISTOGRAMA NORMALIZADO

SALIR

Figura 4.14. Resumen datos estadísticos del ensayo con valores.

Para obtener el gráfico del histograma normalizado hay que pulsar el botón llamado “HISTOGRAMA NORMALIZADO”, este histograma se da en tanto por uno, el valor central o media será cero y el intervalo de $[-1,1]$. El gráfico generado posee herramientas de edición de gráficos que permiten grabarlo, imprimirlo, realizar zoom,...

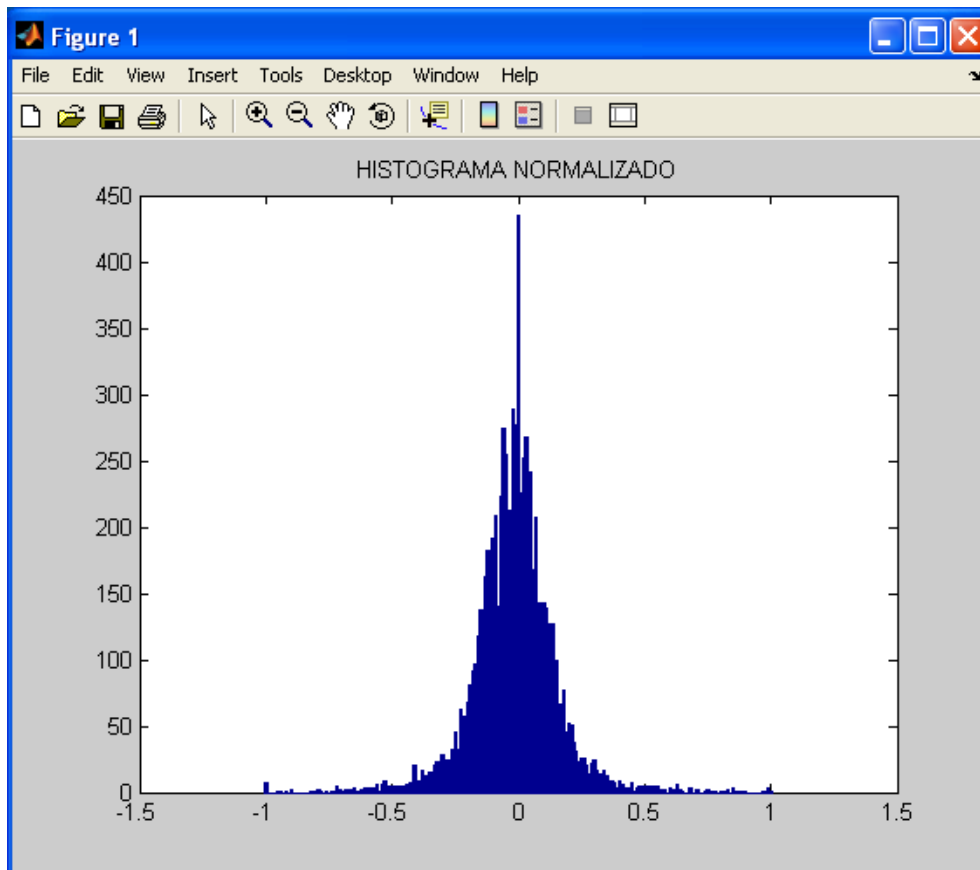


Figura 4.15. Histograma del ensayo.

Este tipo de ventanas también se pueden cerrar independientemente ya que la pantalla de la Figura 4.13., se mantiene en segundo plano siempre mientras se realizan acciones sobre la gráfica editada.

RESULTADOS GRÁFICOS

Esta opción da paso a una ventana que consta de una serie de botones que representan los principales métodos de análisis de vibraciones que se analizan en la aplicación ADEVI3.1. (PSD, Señal temporal, Envolvente, Espectro de la Envolvente, Espectrograma y Wavelet). Figura 4.16.



Figura 4.16. Resumen de gráficas del ensayo.

Si se pulsa el botón “SALIR”, se cierra esta ventana, pero no el programa.

Para visualizar cualquiera de estas gráficas basta con pulsar el botón correspondiente. Con esta acción se obtiene una representación gráfica en una pantalla independiente. El cuadro de texto de la parte superior de la ventana identifica en cada momento el fichero al que corresponde la señal que se está analizando, que es el seleccionado al comienzo de este módulo.

SEÑAL TEMPORAL

Si se selecciona el botón de “SEÑAL TEMPORAL” aparece la siguiente ventana. Figura 4.17.

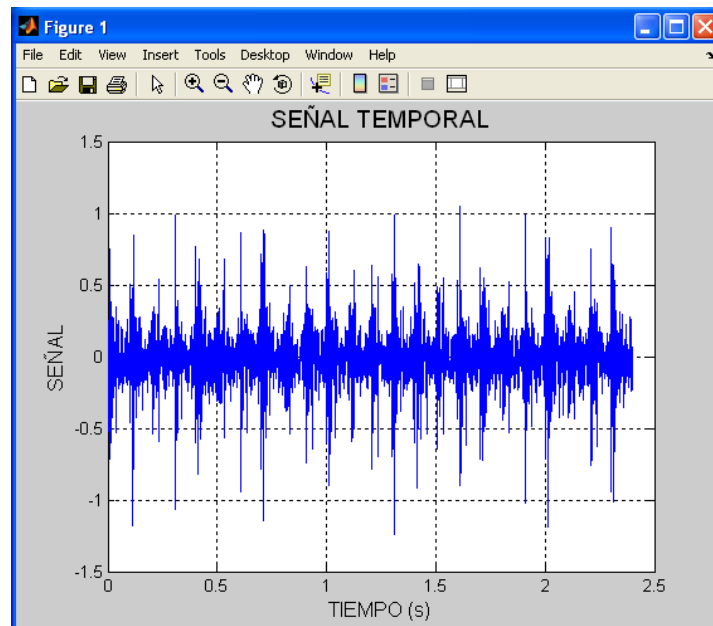


Figura 4.17. Gráfica de la “SEÑAL TEMPORAL”.

ENVOLVENTE

Si, en cambio, se selecciona el botón “ENVOLVENTE” aparecería otra ventana similar, pero con la gráfica de la envolvente. Figura 4.18.

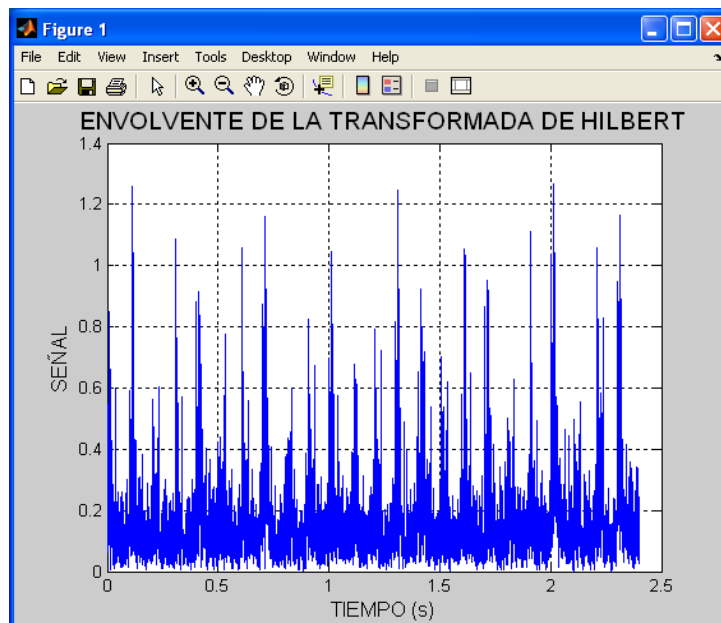


Figura 4.18. Gráfica de la “ENVOLVENTE”.

PSD

Si, en cambio, se quiere ver la gráfica “PSD”. Figura 4.19.

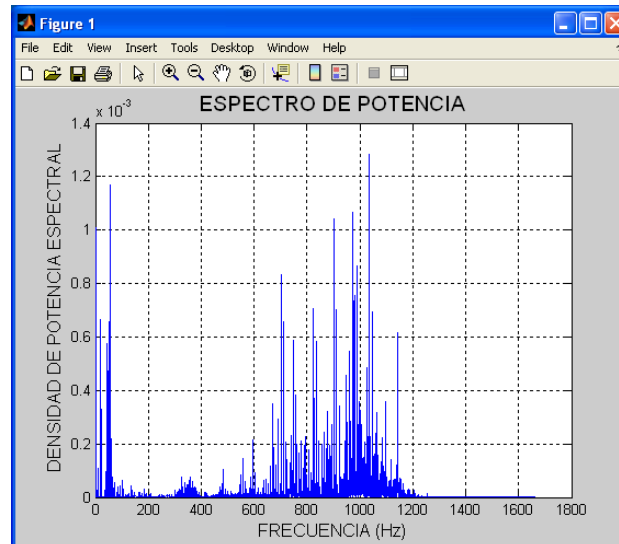


Figura 4.19. Gráfica de la “PSD”.

ESPECTRO ENVOLVENTE

Si se pulsa el botón de “ESPECTRO ENVOLVENTE”, se vería lo que aparece en la Figura 4.20.

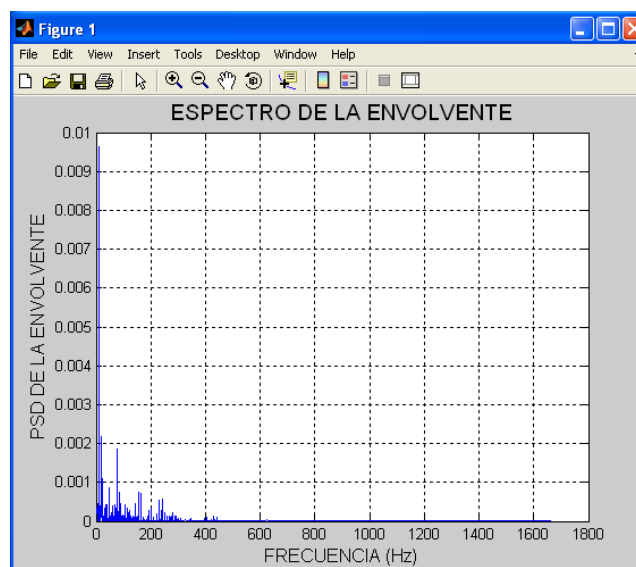


Figura 4.20. Gráfica del “ESPECTRO ENVOLVENTE”.

ESPECTROGRAMA

Pulsando el botón “ESPECTROGRAMA”, se obtiene la siguiente gráfica, Figura 4.21.

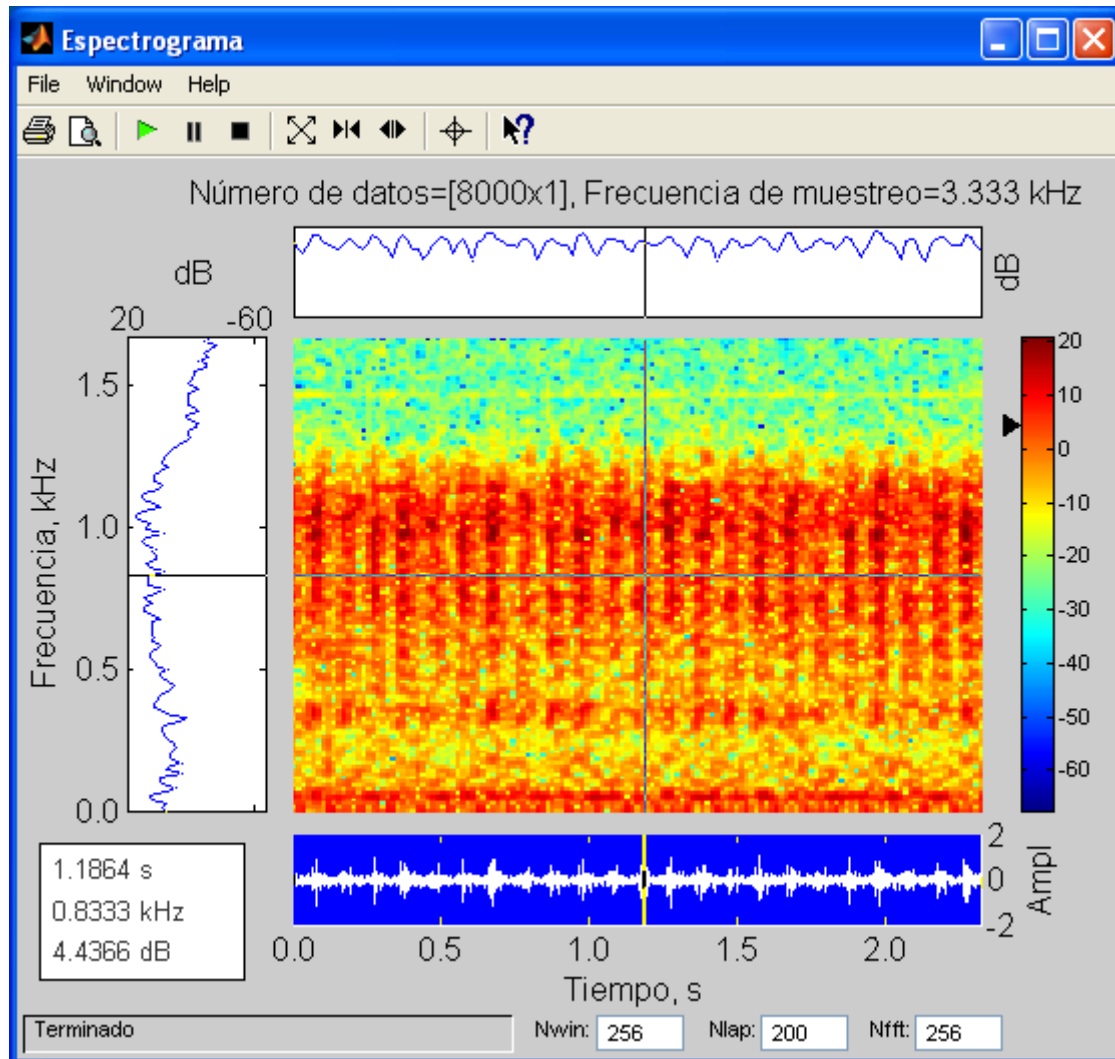


Figura 4.21. Gráfica del “ESPECTROGRAMA”.

WAVELET

Al pulsar el botón “TRANSFORMADA WAVELET” no aparece la gráfica inmediatamente como ocurría con las anteriores gráficas, sino que aparece una ventana pidiendo datos, que son necesarios para obtener su gráfica. Figura 4.22.

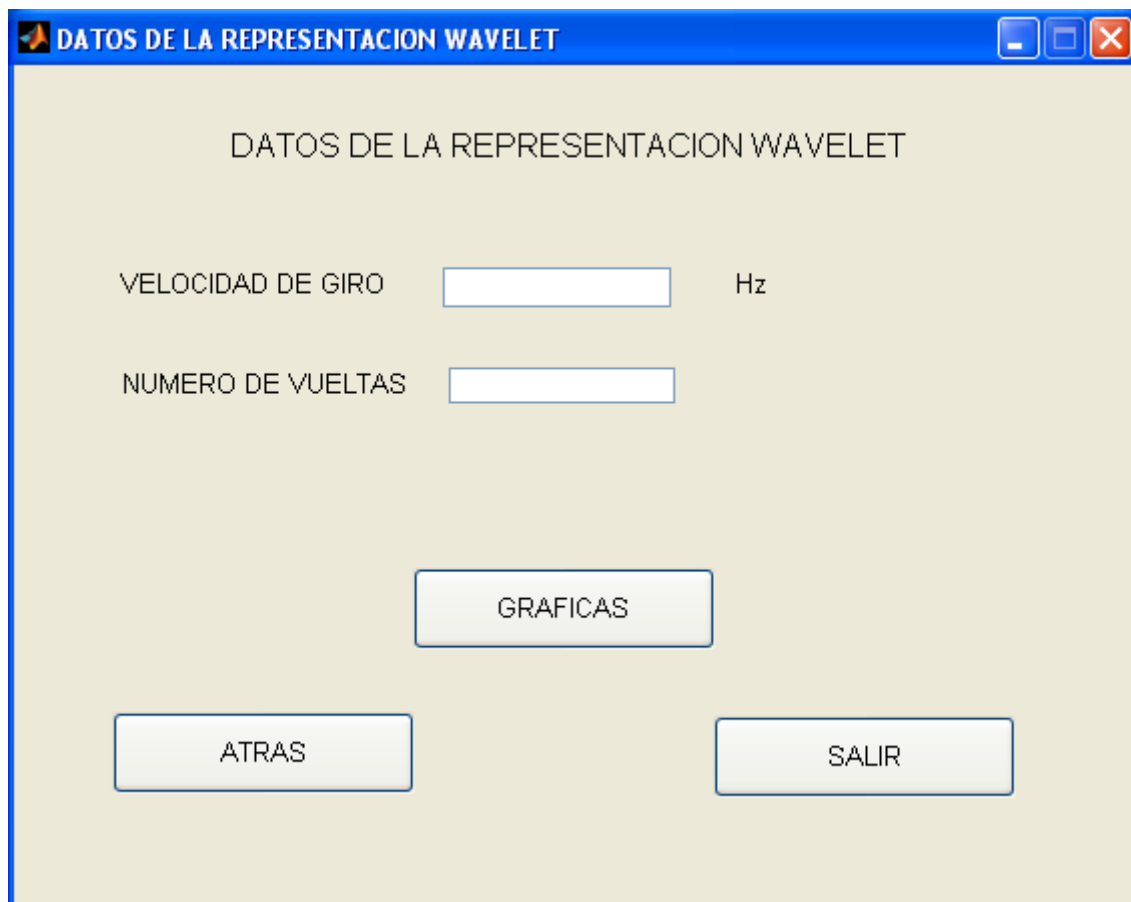


Figura 4.22. Datos “TRANSFORMADA WAVELET”.

Si se pulsa el botón “SALIR”, se sale de la pantalla activa, pero no de la aplicación ADEVI3.1 porque hay ventanas abiertas (Figuras 4.12. y 4.16.).

Si se pulsa el botón “ATRÁS” se vuelve a la pantalla de la Figura 4.16.

Si se pulsa el botón “GRAFICAS” sin haber introducido uno o ninguno de los datos aparece un mensaje de error (igual que el de la Figura 4.10.). Pero, si se han introducido ambos datos (velocidad de giro y número de vueltas), que en este caso se pondrá el valor de velocidad de giro 10 Hz y como número de vueltas 3, el programa abre otra ventana que es la Figura 4.23.

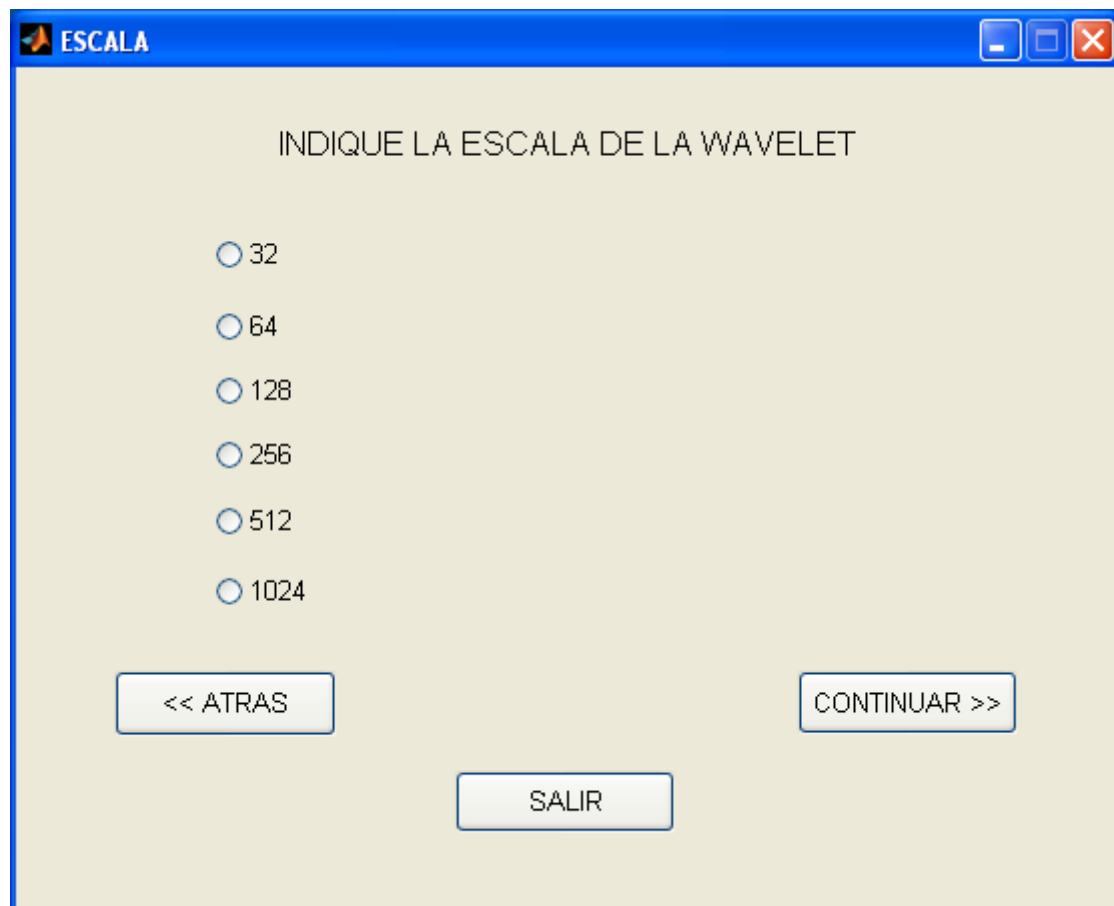


Figura 4.23. Elección de escala de la Transformada Wavelet.

Si no se selecciona ninguna escala y se pulsa “CONTINUAR” aparece la siguiente pantalla de ¡¡ERROR!! Figura 4.24.

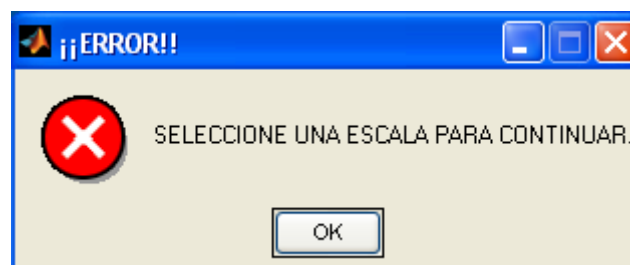


Figura 4.24. Pantalla de error por no seleccionar una escala.

Una vez seleccionado la escala, el siguiente paso es seleccionar la Wavelet madre que se desea para la transformación. Para ello se pasa a una ventana que consta de un número de botones en los cuales se escribe el nombre del tipo de la Wavelet (Figura 4.25.). Si ésta es de orden único, pasará directamente a lanzarse la gráfica en una pantalla independiente con las herramientas necesarias para su edición. (Figura 4.26.).

Si por el contrario la Wavelet tiene varias órdenes, se dará paso a otra ventana en la que se pide el número de orden que se desea (Figura 4.27.), tras lo cual irá directamente la pantalla con la representación gráfica (Figura 4.28.).

Las Wavelet madres que tienen varias órdenes son Daubechies (Figura 4.27.), Symlet (Figura 4.29.), Coiflet (Figura 4.30.) y Biortogonal (Figura 4.31.). A continuación se muestran las pantallas donde te indican el número de orden que tiene cada una, aunque la representación gráfica solamente se hará en el caso de Daubechies porque la ventana es igual en todos los casos.



Figura 4.25. Elección de Wavelet madre.

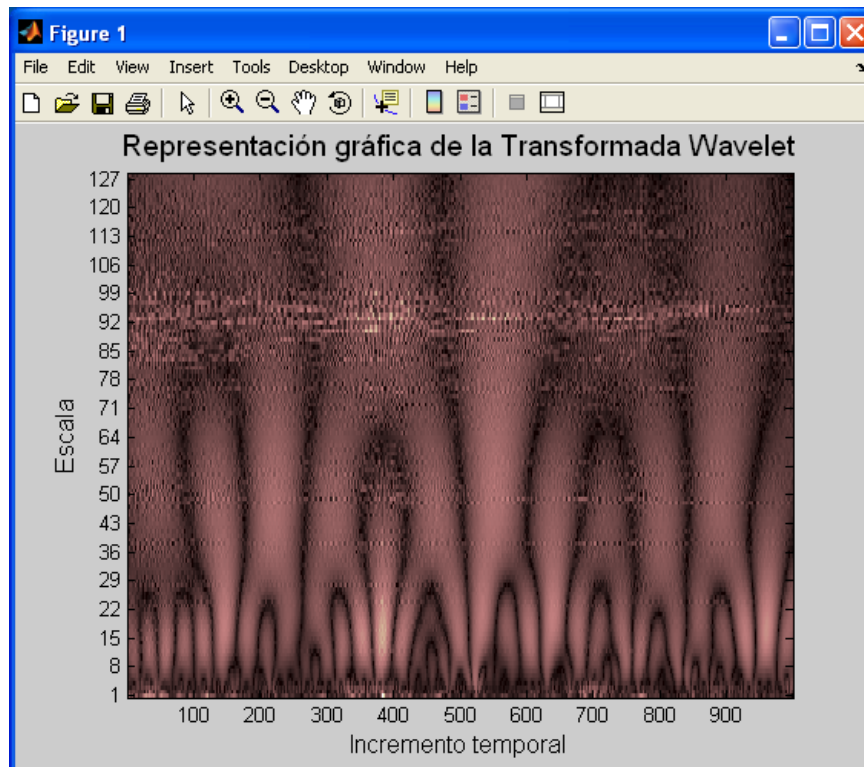


Figura 4.26. Mexican Hat representación de Wavelet de orden único con escala 128.

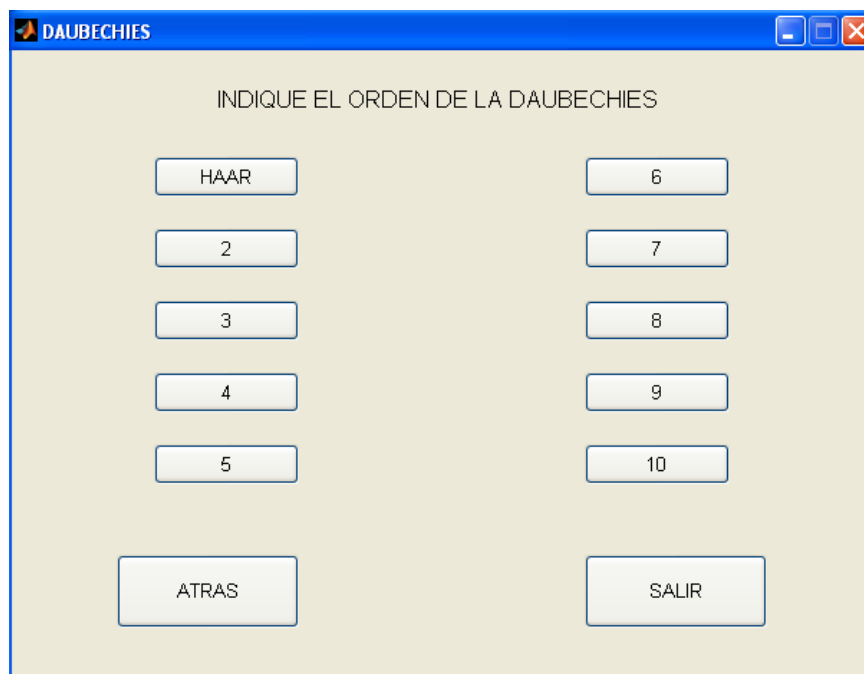


Figura 4.27. Elección del orden de una Daubechies como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

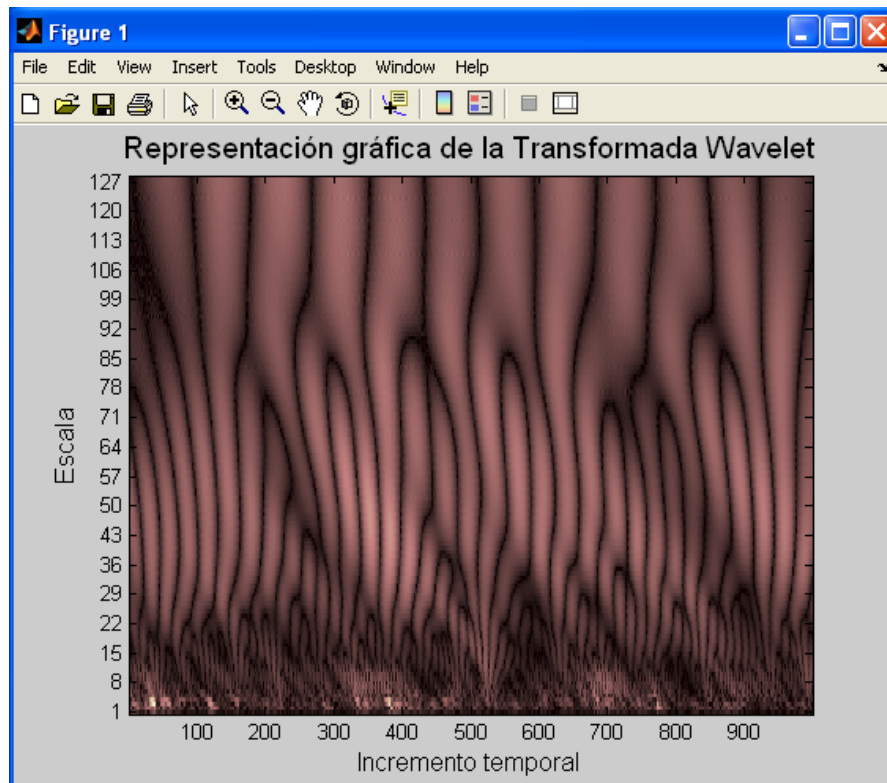


Figura 4.28. Daubechies como representación de Wavelet de orden ocho con escala 128.

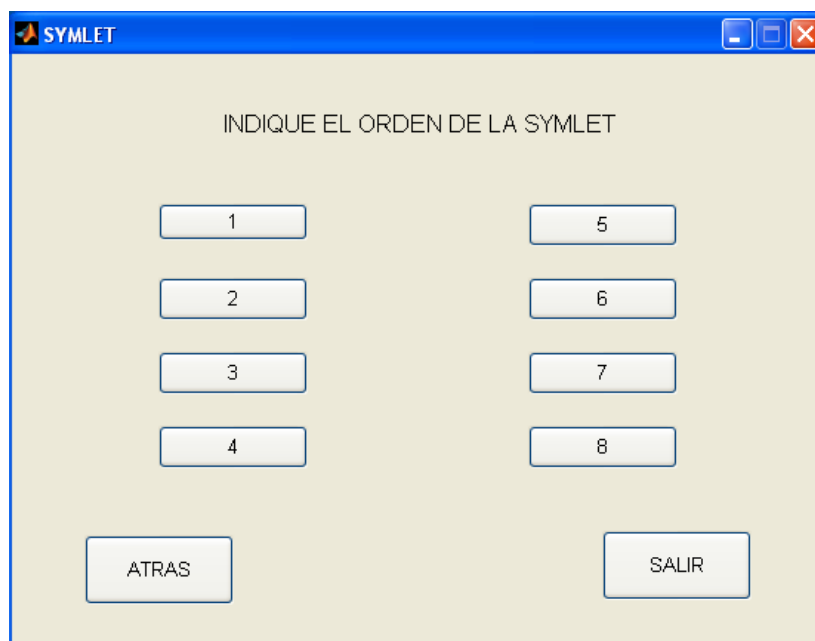


Figura 4.29. Elección del orden de una Symlet como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

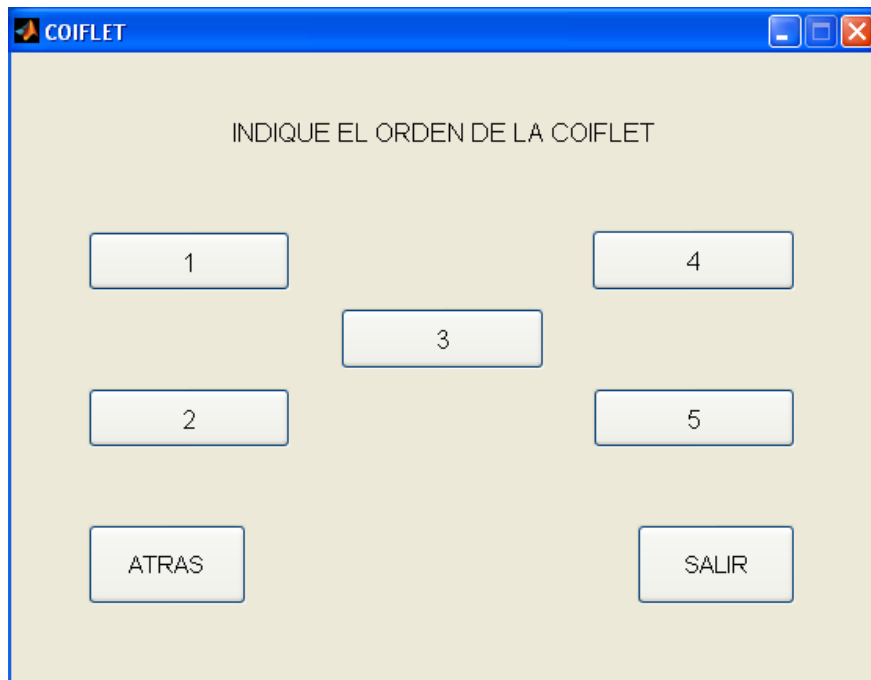


Figura 4.30. Elección del orden de una Coiflet como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

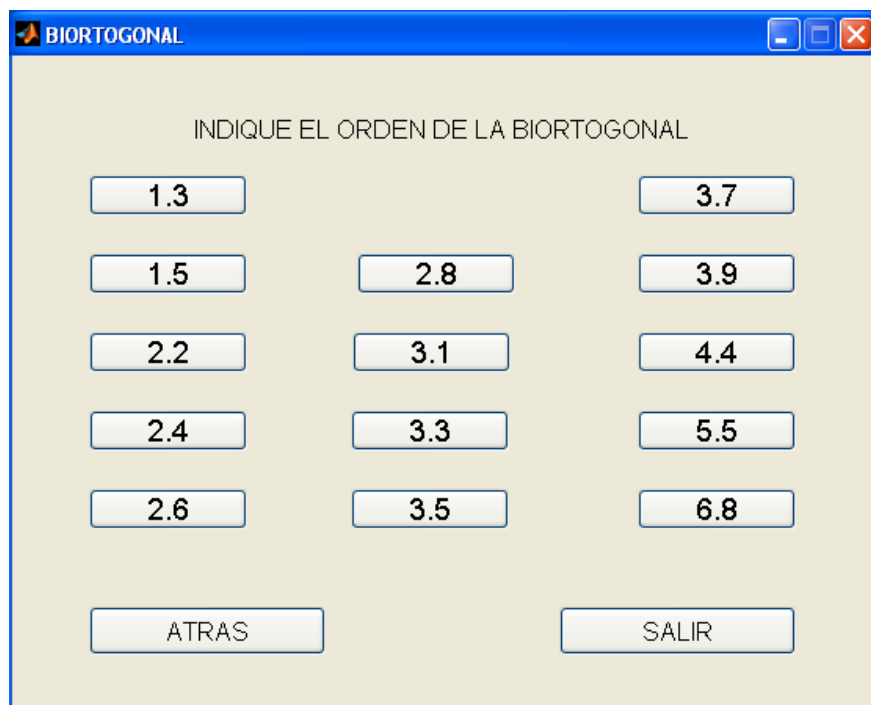


Figura 4.31. Elección del orden de una Coiflet como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

3.1.4. Simulación de vibraciones en rodamientos

El segundo subprograma del que se compone la aplicación es la simulación de vibraciones por defectos en rodamientos, este módulo se selecciona desde la ventana de inicio de la aplicación general (Figura 4.2), pulsando el botón llamado “SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS”.

SELECCIÓN DEL DEFECTO

Una vez pulsado el botón “SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS” aparece la primera pantalla propia del segundo módulo de la aplicación ADEVI3.1. Figura 4.32.

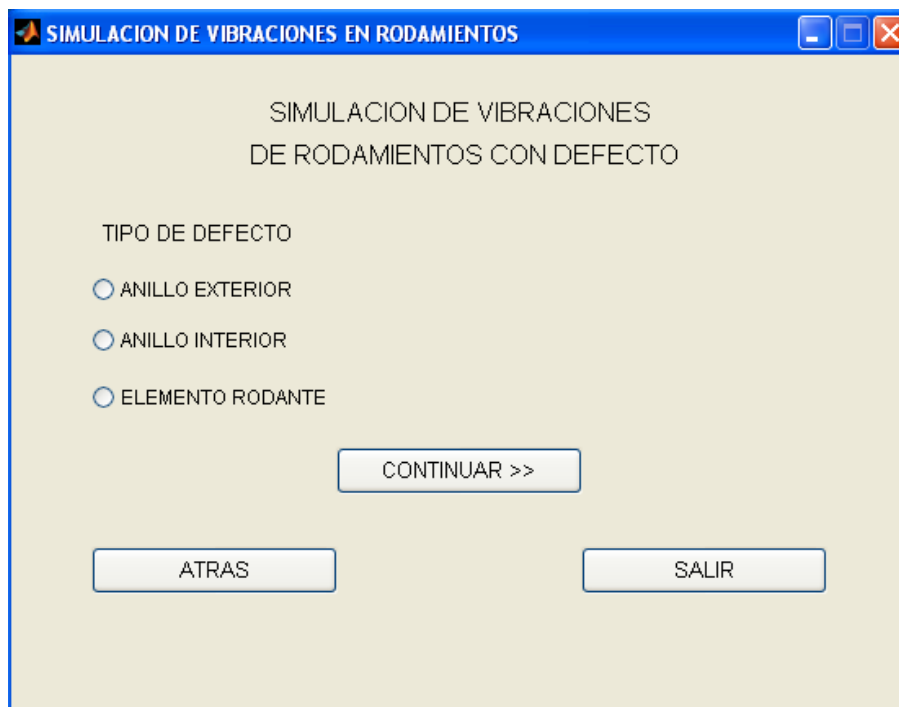


Figura 4.32. Pantalla inicial de la simulación de vibraciones en rodamientos.

Esta pantalla contiene las opciones posibles de defectos en los rodamientos que se estudian en esta aplicación. Éstas son:

- Defecto en anillo interno.
- Defecto en anillo externo.
- Defecto en el elemento rodante.

Para acceder a cada una de ellas es necesario seleccionarla, son excluyentes entre sí. Una vez seleccionada una de las tres, se pulsa el botón “CONTINUAR >>”. Esta ventana también posee las opciones de volver atrás, que lleva a la ventana de inicio de la aplicación (Figura 4.2.) y la opción de salir que cierra la aplicación.

En cada uno de los tres tipos de defecto descritos se accede a una pantalla en la que es necesario introducir una serie de parámetros para simular el defecto. Estos datos han de ser conocidos por el usuario y se agrupan en cuatro grandes bloques:

- A. Características de la muestra. Son los datos de la señal, en este caso son la frecuencia de muestreo y el número de puntos del ensayo.
- B. Características del sistema. Engloba los parámetros del sistema como son el coeficiente de amortiguamiento de la máquina (α), f_0 que es la frecuencia natural de la máquina o frecuencia de resonancia del rodamiento, y la amplitud y frecuencia de un defecto de desalineamiento, denominados f_1 y A_1 . También se incluye la velocidad de giro.
- C. Características del rodamiento. Los parámetros propios del rodamiento, estos son el diámetro medio del rodamiento, D_m , el diámetro del elemento rodante, D_b , el ángulo de contacto del rodamiento y el número de elementos rodantes, Z .
- D. Características del defecto. Finalmente se contemplan los parámetros del defecto de los rodamientos tales como la amplitud y frecuencia de un defecto en la pista interior de un rodamiento, A_i y f_i , el tamaño de defecto, zona de carga, etc.

Si al pulsar el botón “CONTINUAR>>” sin haber seleccionado un tipo aparece el siguiente mensaje de ¡¡ERROR!! (Figura 4.33.)

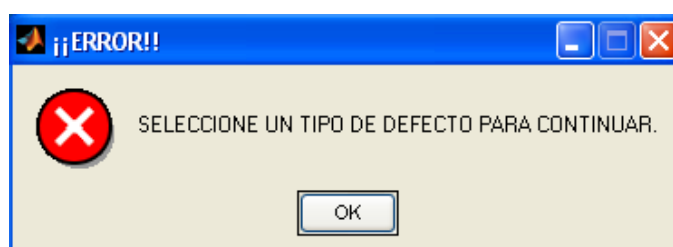
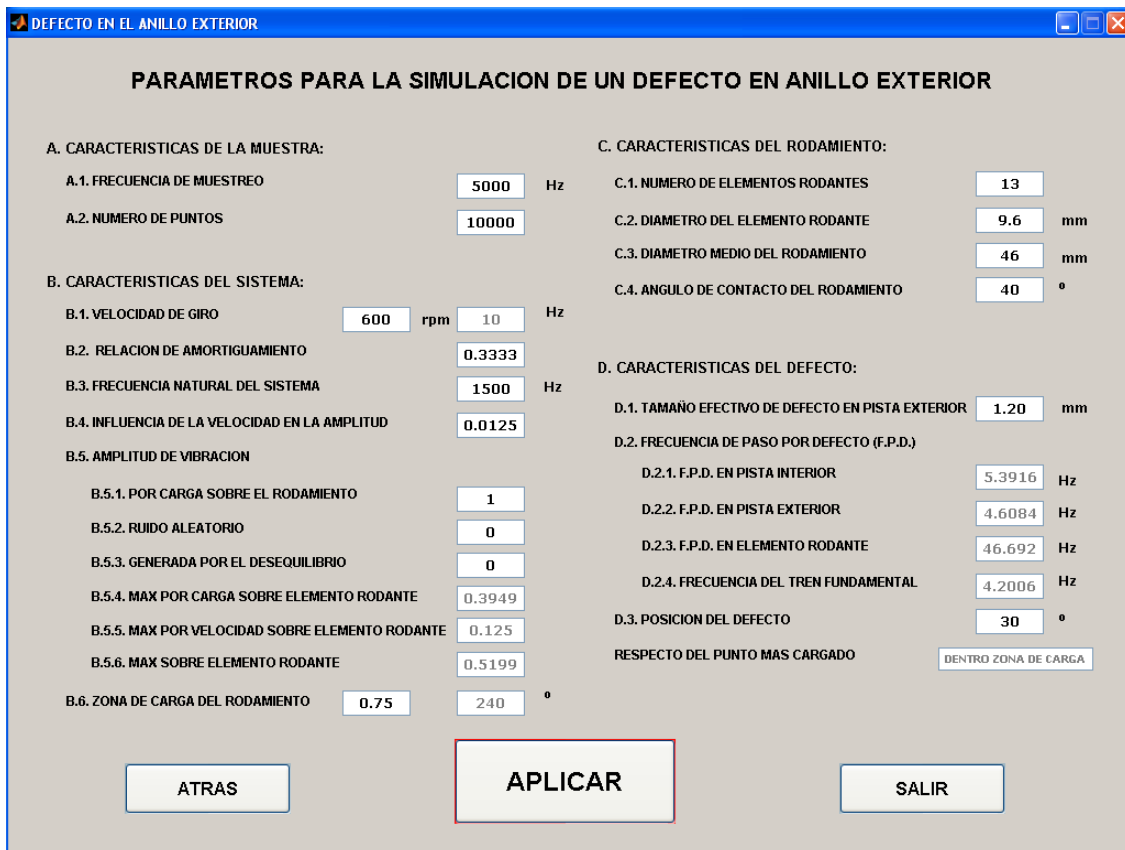


Figura 4.33. Mensaje de error.

DEFECTO EN ANILLO EXTERIOR

La pantalla de este subprograma contiene una serie de cuadros de texto divididos en los grupos mencionados anteriormente; características de la muestra, del sistema, del rodamiento y del defecto. Estos datos presentan unos valores por defecto que se podrán modificar para representar las gráficas de defectos para el ensayo requerido. La frecuencia de giro en el anillo interior, así como la amplitud por defecto de la velocidad y la frecuencia de paso son datos que no son susceptibles de ser cambiados por teclado, dependen de otros parámetros. Cambiarán automáticamente al cambiar alguno de los parámetros de los que dependen.

Para que todos los cambios que se realicen sean efectivos es necesario pulsar el botón “APLICAR”. Figura 4.34.



PARAMETROS PARA LA SIMULACION DE UN DEFECTO EN ANILLO EXTERIOR			
A. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:			
A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO	5000	Hz	
A.2. NUMERO DE PUNTOS	10000		
B. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA:			
B.1. VELOCIDAD DE GIRO	600 rpm	10 Hz	
B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO	0.3333		
B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA	1500	Hz	
B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD	0.0125		
B.5. AMPLITUD DE VIBRACION			
B.5.1. POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO	1		
B.5.2. RUIDO ALEATORIO	0		
B.5.3. GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO	0		
B.5.4. MAX POR CARGA SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.3949		
B.5.5. MAX POR VELOCIDAD SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.125		
B.5.6. MAX SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.5199		
B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO	0.75	240 °	
C. CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO:			
C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES	13		
C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE	9.6	mm	
C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO	46	mm	
C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO	40	°	
D. CARACTERISTICAS DEL DEFECTO:			
D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA EXTERIOR	1.20	mm	
D.2. FRECUENCIA DE PASO POR DEFECTO (F.P.D.)			
D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR	5.3916	Hz	
D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR	4.6084	Hz	
D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE	46.692	Hz	
D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL	4.2006	Hz	
D.3. POSICION DEL DEFECTO	30	°	
RESPECTO DEL PUNTO MAS CARGADO: DENTRO ZONA DE CARGA			

Figura 4.34. Datos de defecto en anillo exterior.

Si se pulsa “SALIR” se sale del programa, y el botón “ATRÁS” se vuelve a la Figura 4.32. Mientras que si se pulsa el botón “APLICAR” aparece la siguiente pantalla (Figura 4.35.).

INFORMACIÓN SOBRE ANILLO EXTERIOR

Esta ventana da la opción de hacer un estudio más detallado del defecto en anillo exterior, pues permite la opción de mostrar gráficas, de guardar los datos y de hacer otros análisis (los mismos que se han hecho en el apartado “3.1.3. Análisis de vibraciones”).

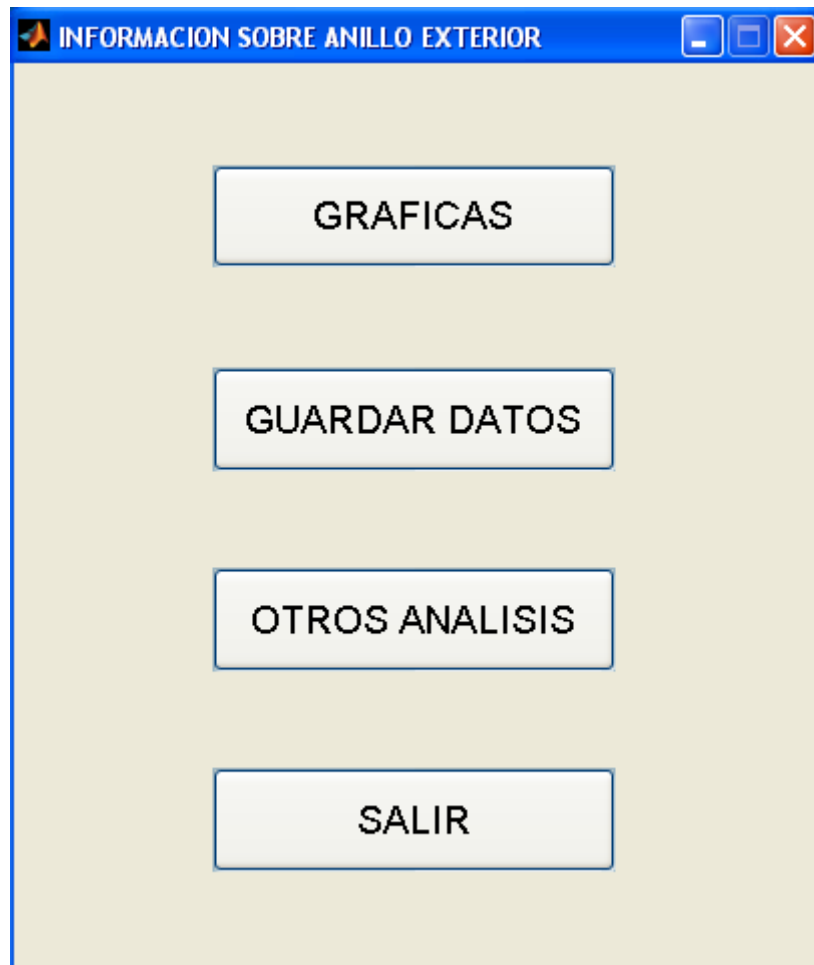


Figura 4.35. Opciones para el defecto de anillo exterior.

Si se pulsa el botón “GRAFICAS” aparecen las ventanas de la Figura 4.36. y de la Figura 4.37., pero no se cierra esta ventana (Figura 4.35.) por si se desea realizar las otras opciones, esto mismo se hace con “GUARDAR DATOS” y “OTROS ANALISIS”. Si se pulsa el botón “GUARDAR DATOS”, aparecerá la ventana de la Figura 4.38. Si además quiere pulsar el botón “OTROS ANÁLISIS” se va a la Figura 4.12. y continúa como se ha explicado anteriormente. Botón “SALIR” cierra esta ventana.

GRÁFICAS DEL ANILLO EXTERIOR

Una vez aplicados los cambios necesarios para visualizar las gráficas solamente faltaría pulsar el botón llamado “GRAFICAS” y, de forma automática, se generan dos figuras con las gráficas de resultados.

La primera figura se divide en dos, por un lado, la gráfica de la señal temporal emitida por un rodamiento con defecto en anillo exterior así como la envolvente de la zona de carga y, por otro, un detalle de la señal temporal anterior y la envolvente de esta señal calculada como el valor absoluto de la transformada de Hilbert. Figura 4.36.

La segunda figura también contiene dos gráficos, en el primero se representa el espectro de potencia de la señal anterior, en el último de los gráficos se representa el espectro de potencia de la envolvente. Figura 4.37.

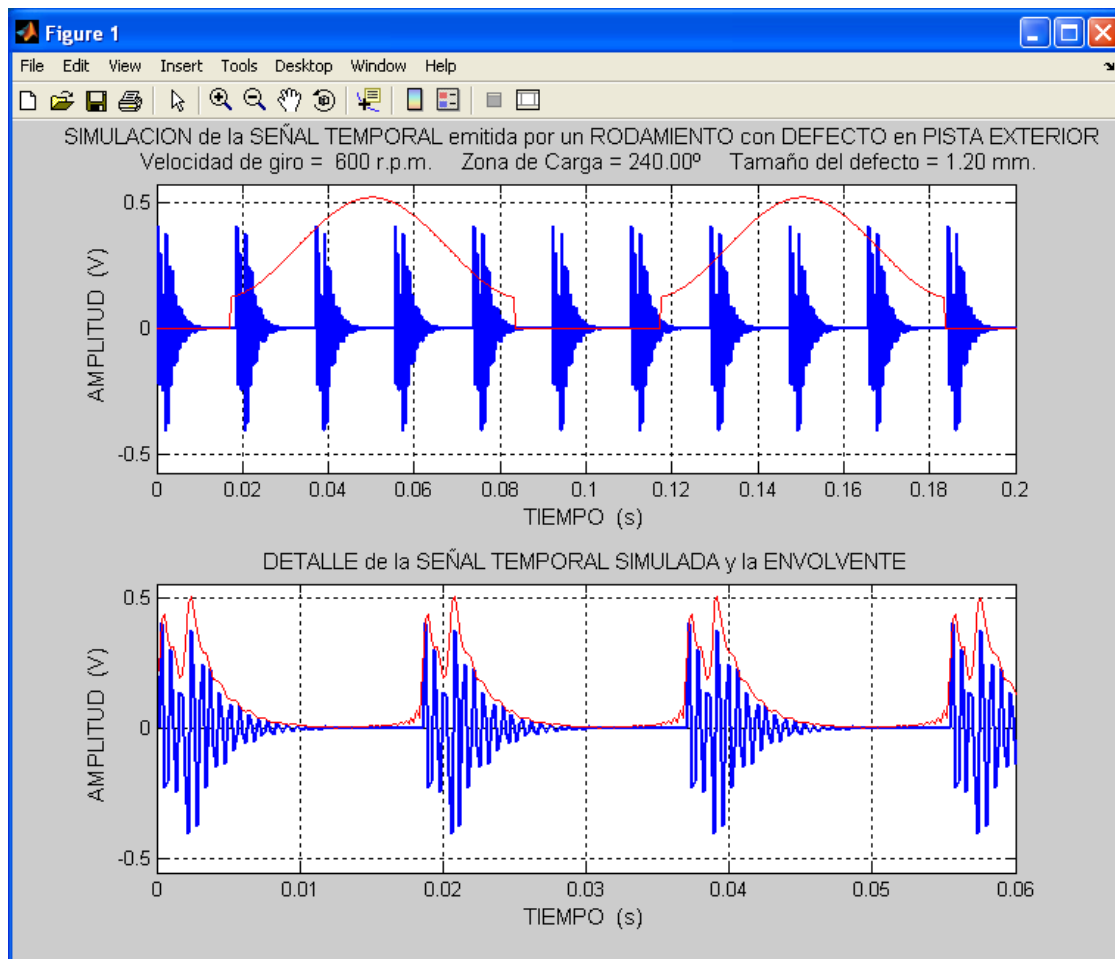


Figura 4.36. Gráfica de la señal temporal, envolvente de la zona de carga y detalle de la envolvente.

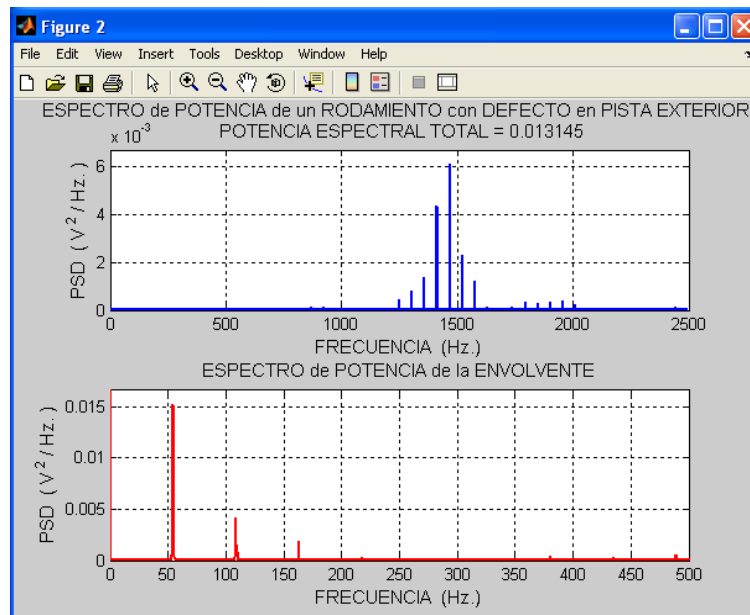


Figura 4.37. Espectro de potencia y espectro de potencia de la envolvente de la señal.

GUARDAR DATOS DEL ANILLO EXTERIOR

Antes de dar al botón de “GUARDAR” se escribe el nombre del archivo y se selecciona la ruta donde desee que se encuentre el archivo. Figura 4.38.

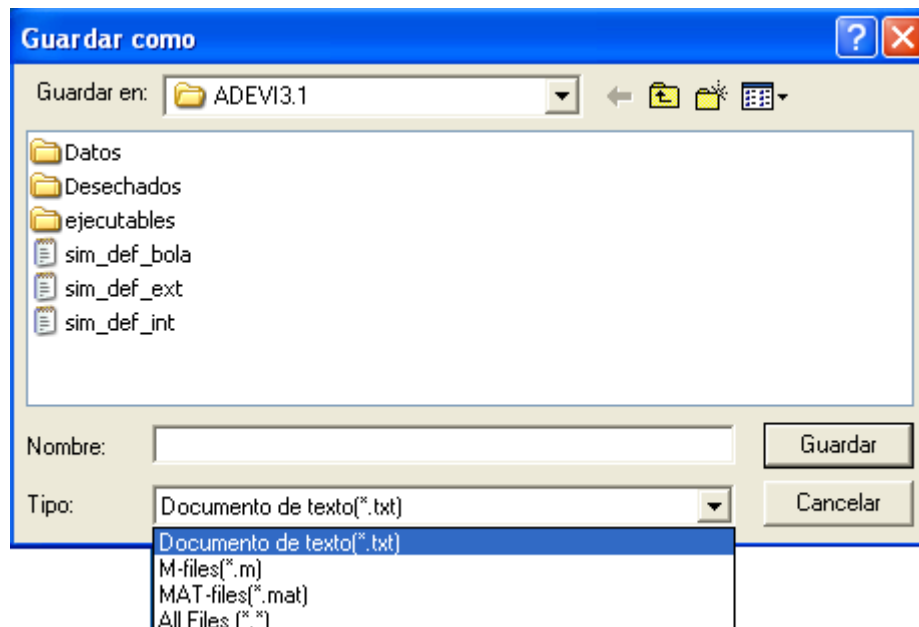
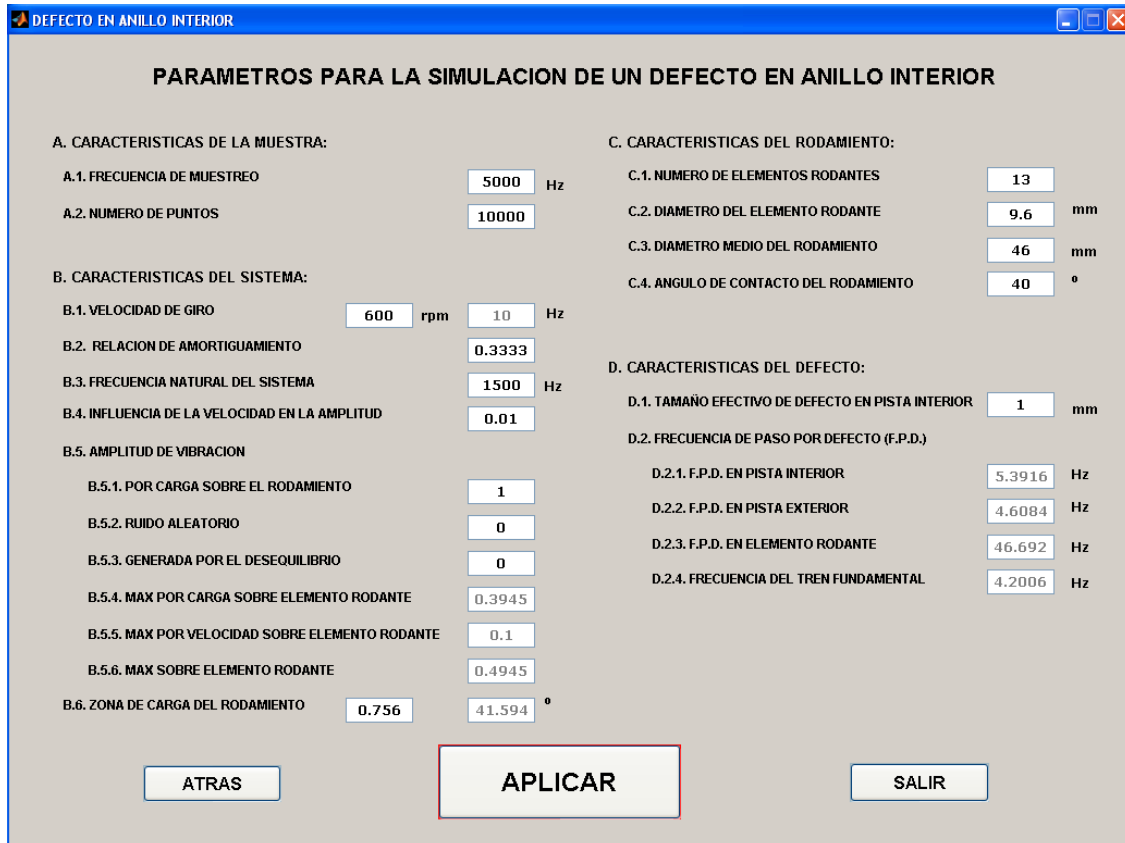


Figura 4.38. Pantalla para guardar datos.

DEFECTO EN ANILLO INTERIOR

Esta opción permite estudiar los defectos del anillo interior de un rodamiento, conocidos una serie de parámetros, Figura 4.39. Estos parámetros se introducen en la misma pantalla de entrada de datos y se dividen en los cuatro grandes grupos, similares a los parámetros en anillo exterior.



PARAMETROS PARA LA SIMULACION DE UN DEFECTO EN ANILLO INTERIOR			
A. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:			
A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO	5000	Hz	
A.2. NUMERO DE PUNTOS	10000		
B. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA:			
B.1. VELOCIDAD DE GIRO	600	rpm	10 Hz
B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO	0.3333		
B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA	1500	Hz	
B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD	0.01		
B.5. AMPLITUD DE VIBRACION			
B.5.1. POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO	1		
B.5.2. RUIDO ALEATORIO	0		
B.5.3. GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO	0		
B.5.4. MAX POR CARGA SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.3945		
B.5.5. MAX POR VELOCIDAD SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.1		
B.5.6. MAX SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.4945		
B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO	0.756		41.594 °
C. CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO:			
C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES	13		
C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE	9.6	mm	
C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO	46	mm	
C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO	40	°	
D. CARACTERISTICAS DEL DEFECTO:			
D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA INTERIOR	1	mm	
D.2. FRECUENCIA DE PASO POR DEFECTO (F.P.D.)			
D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR	5.3916	Hz	
D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR	4.6084	Hz	
D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE	46.692	Hz	
D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL	4.2006	Hz	

ATRAS **APLICAR** SALIR

Figura 4.39. Datos de defectos en anillo interior.

Si se pulsa el botón “APLICAR” se pasa a otra ventana (Figura 4.40.).

INFORMACIÓN SOBRE ANILLO INTERIOR

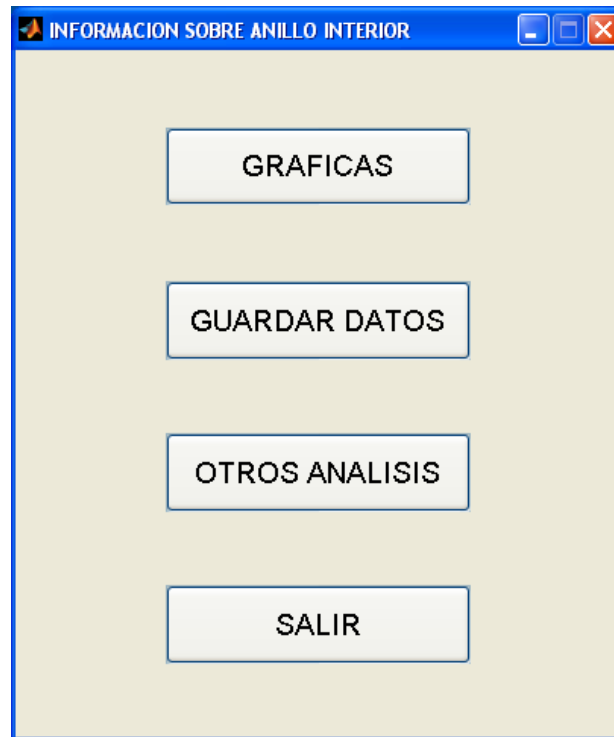


Figura 4.40. Opciones para el defecto en anillo interior.

Si se pulsa el botón “GRAFICAS” aparecen las ventanas de la Figura 4.41. y de la Figura 4.42., pero no se cierra esta ventana por si se desea realizar las otras opciones, esto mismo se hace con “GUARDAR DATOS” y “OTROS ANALISIS”. Si desea guardar datos se pulsará el botón “GUARDAR DATOS” y aparecerá la misma ventana de la Figura 4.38. Si además quiere pulsar el botón “OTROS ANÁLISIS” se va a la Figura 4.12. y continúa como se ha explicado anteriormente. Botón “SALIR” cierra esta ventana.

GRÁFICAS DEL ANILLO INTERIOR

Se generan dos figuras, en la primera de ellas se representa la gráfica de la señal temporal emitida por un rodamiento con defecto en anillo interior así como la envolvente de la zona de carga y por otro lado un detalle de la señal temporal y la envolvente de esta señal. Figura 4.41.

En la segunda figura se representa el espectro de potencia de la señal anterior, y el espectro de potencia de la envolvente. Figura 4.42.

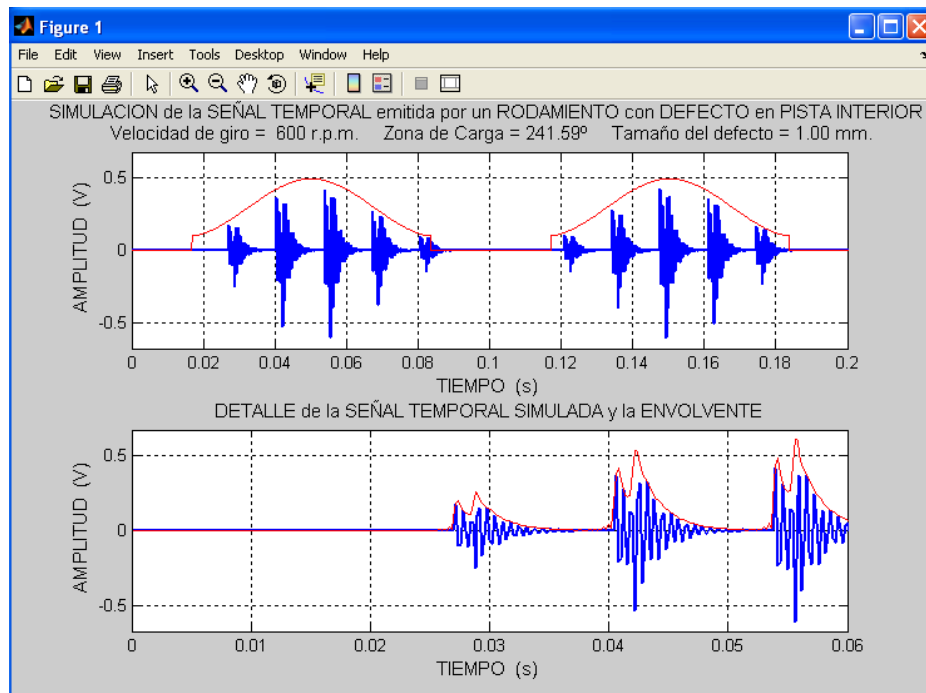


Figura 4.41. Gráfica de la señal temporal, envolvente de la zona de carga y detalle de la envolvente.

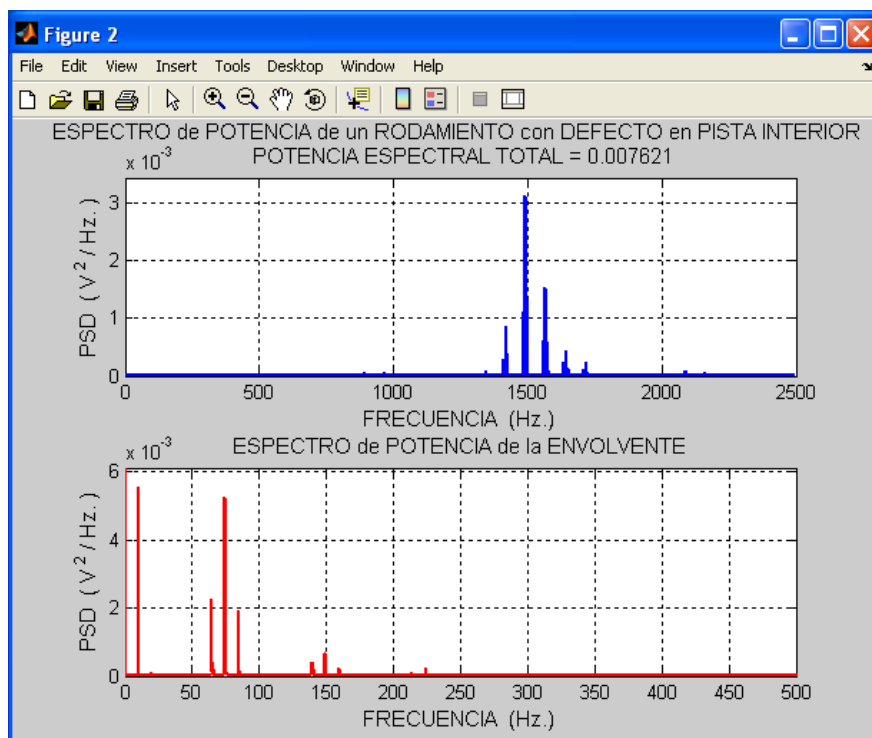
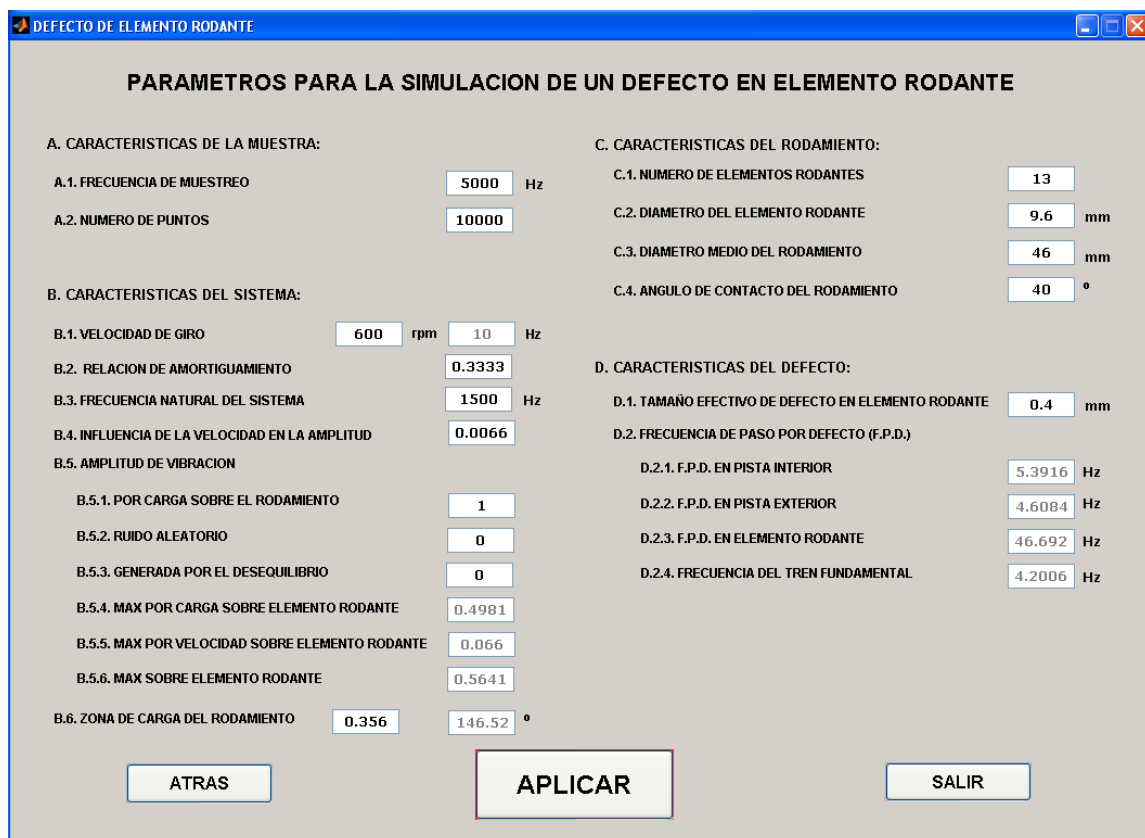


Figura 4.42. Espectro de potencia y espectro de potencia de la envolvente de la señal.

DEFECTO EN ELEMENTO RODANTE

Se accede a una ventana (Figura 4.43.) con múltiples cuadros de texto, en principio, vienen rellenos con unos parámetros por defecto que son susceptibles de cambiarse. Pero no todos los datos son independientes, el valor de la frecuencia de giro del anillo interior depende de otros parámetros introducidos, lo mismo ocurre con la frecuencia de defecto en jaula y la frecuencia de giro, al igual que en los defectos anteriores estos datos aparecen sombreados y no se pueden editar, cambian de valor al modificar alguno de los parámetros de los que depende y al pulsar el botón de “APLICAR”.



PARAMETROS PARA LA SIMULACION DE UN DEFECTO EN ELEMENTO RODANTE			
A. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:			
A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO	5000	Hz	
A.2. NUMERO DE PUNTOS	10000		
B. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA:			
B.1. VELOCIDAD DE GIRO	600	rpm	10 Hz
B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO	0.3333		
B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA	1500	Hz	
B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD	0.0066		
B.5. AMPLITUD DE VIBRACION			
B.5.1. POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO	1		
B.5.2. RUIDO ALEATORIO	0		
B.5.3. GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO	0		
B.5.4. MAX POR CARGA SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.4981		
B.5.5. MAX POR VELOCIDAD SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.066		
B.5.6. MAX SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.5641		
B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO	0.356		146.52 °
C. CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO:			
C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES	13		
C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE	9.6	mm	
C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO	46	mm	
C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO	40	°	
D. CARACTERISTICAS DEL DEFECTO:			
D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN ELEMENTO RODANTE	0.4	mm	
D.2. FRECUENCIA DE PASO POR DEFECTO (F.P.D.)			
D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR	5.3916	Hz	
D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR	4.6084	Hz	
D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE	46.692	Hz	
D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL	4.2006	Hz	

ATRAS APLICAR SALIR

Figura 4.43. Datos de defectos en elemento rodante.

Si se pulsa el botón “APLICAR” se abre una ventana (Figura 4.44.).

INFORMACIÓN SOBRE ELEMENTO RODANTE

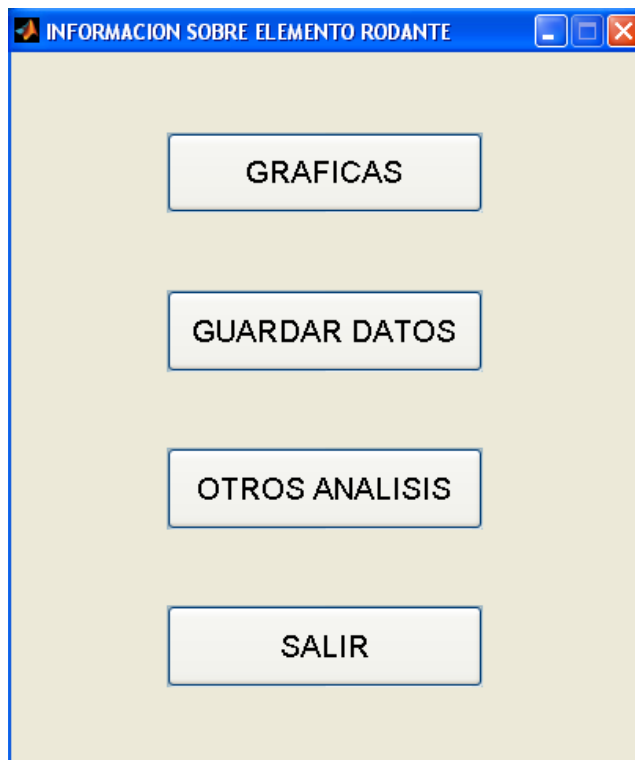


Figura 4.44. Opciones para la simulación.

Si se pulsa el botón “GRAFICAS” aparecen las ventanas de la Figura 4.45. y de la Figura 4.46., pero no se cierra esta ventana por si se desea realizar las otras opciones, esto mismo se hace con “GUARDAR DATOS” y “OTROS ANALISIS”. Si desea guardar datos pulsará el botón “GUARDAR DATOS” y aparecerá la ventana de la Figura 4.38. Si además quiere pulsar el botón “OTROS ANÁLISIS” se va a la Figura 4.12.y continúa como se ha explicado anteriormente. Botón “SALIR” cierra esta ventana.

GRÁFICAS DEL ELEMENTO RODANTE

Las figuras generadas contienen las mismas gráficas que en los apartados anteriores, pero en este caso para el defecto en elemento rodante. Figuras 4.45. y 4.46.

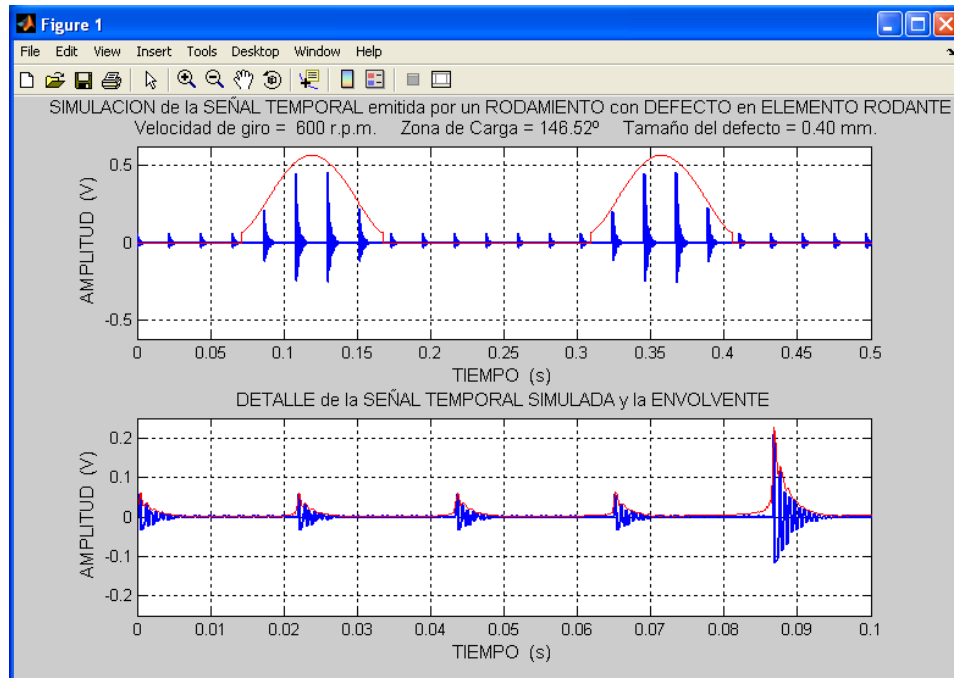


Figura 4.45. Gráfica de la señal temporal, envolvente de la zona y detalle de la envolvente.

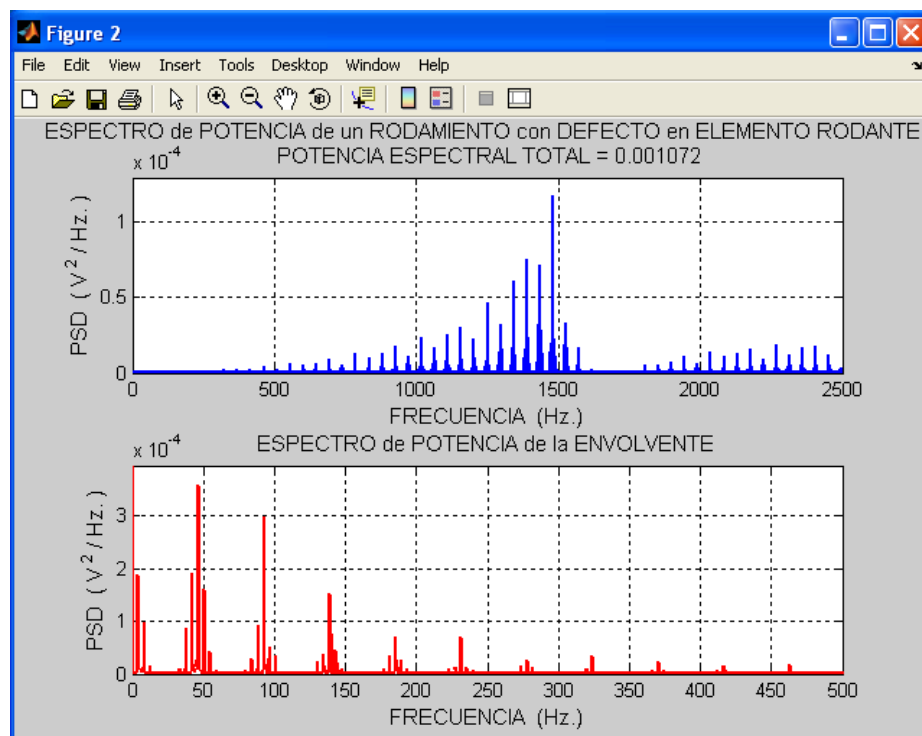


Figura 4.46. Espectro de potencia y espectro de potencia de la envolvente de la señal.

3.2. ADEVI3.1 en inglés

La aplicación funciona de la misma manera que en el apartado “3.1. ADEVI3.1 en castellano”, por tanto, se expondrá a continuación las pantallas, pero sin explicarlo pues se ha hecho anteriormente.

3.2.1. Title page, start

La aplicación comienza al ejecutar el archivo de inicio “TITLEPAGESTART.m” mediante el cual aparecerá una pantalla en la que se muestra la presentación de la aplicación. Figura 4.47.

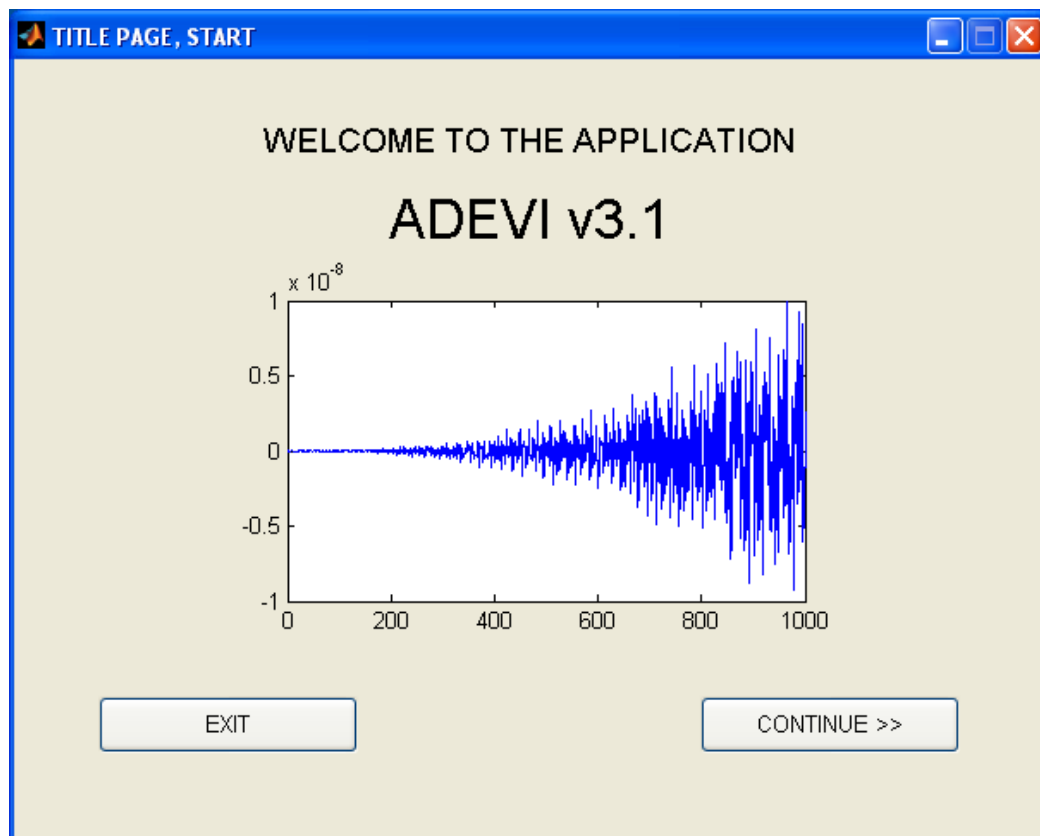


Figura 4.47. Pantalla de inicio de la aplicación.

Si se pulsa el botón “EXIT” se cierra la aplicación, si, en cambio, se pulsa el botón “CONTINUE” se pasa a otra ventana (Figura 4.48.).

3.2.2. Title page

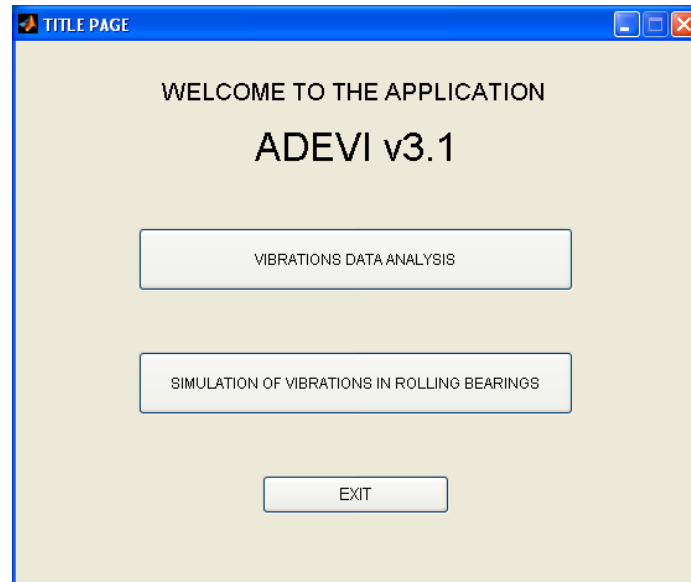


Figura 4.48. Pantalla inicial de la aplicación ADEVI 3.1.

3.2.3. Vibrations analysis

OBTENCIÓN DE DATOS PARA ANALIZAR

Figura 4.49.

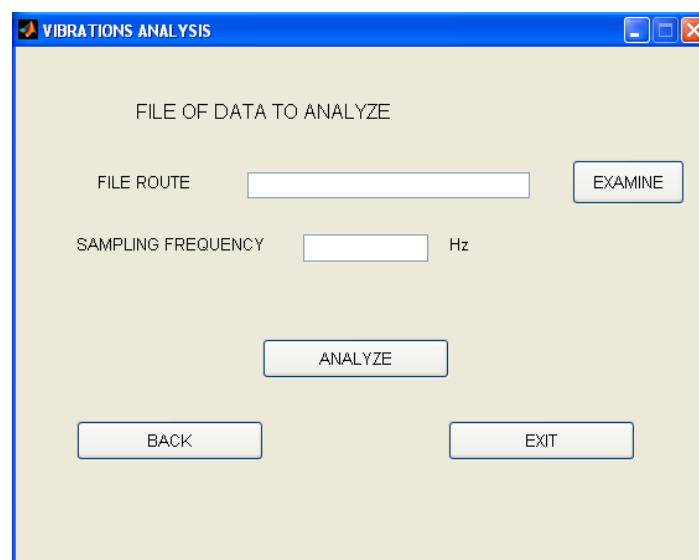


Figura 4.49. Pantalla inicial del programa de análisis de vibraciones.

ENTRADA DE DATOS

Esta ventana es la que se encarga de la captación de los datos necesarios para el análisis de la señal. Los dos datos que necesita la aplicación son los siguientes:

- A. *Ruta del fichero*. La ruta del fichero se rellena mediante el botón “EXAMINE” que se explica a continuación.
- B. *Frecuencia de muestreo*. La frecuencia de muestreo tiene que ser un dato conocido por el usuario y se introduce por teclado en el cuadro correspondiente.

Para introducir la ruta donde se encuentra el fichero de la señal a analizar se recurre al botón “EXAMINE” que permite una búsqueda del fichero en todas las ubicaciones posibles del PC.

Esto se hace así para evitar las posibles equivocaciones que pueden existir si se introduce este dato directamente por teclado, puede escribirse de forma incorrecta o puede escribirse un fichero que no existe.

Al pulsar el botón “EXAMINE” se accede a una ventana intermedia (“BROWSER”) que contiene a su vez otro botón llamado “Browse...” y un cuadro de texto que en principio se encuentra en blanco. Figura 4.50.

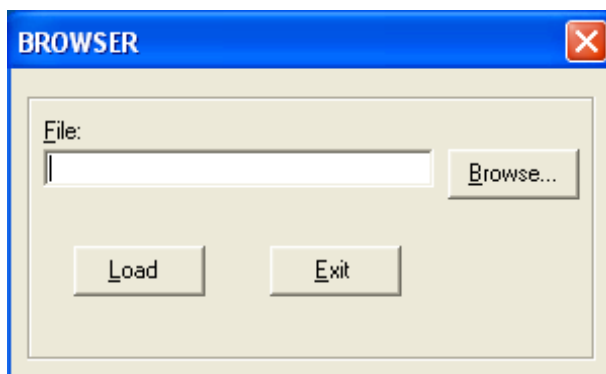


Figura 4.50. Pantalla intermedia. Selección del fichero a analizar.

Pulsando el botón de “Browse...” se accede a la ventana típica del Explorador de Windows, en la que se puede seleccionar el archivo que queremos analizar buscando en las diferentes ubicaciones del PC. Figura 4.51.

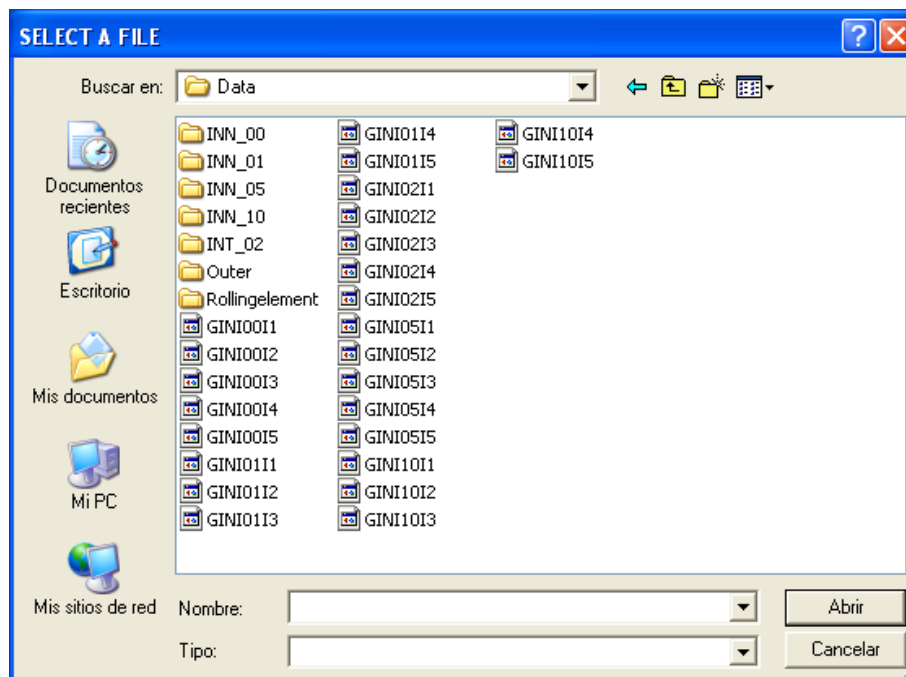


Figura 4.51. Explorador de Windows.

Una vez seleccionado se pulsa “Abrir” y aparece de nuevo la ventana intermedia (Figura 4.50.), pero esta vez con la ruta del archivo en el cuadro de texto, esto permite ver si se ha elegido correctamente el archivo y en caso contrario el programa permite volver a seleccionar otro archivo pulsando de nuevo el botón “Browse...” antes de continuar con el programa. Seguidamente se graban los datos mediante la tecla “Load”.

Si no se quiere grabar los datos del fichero se pulsa “Salir” para cerrar la ventana y se vuelve a la pantalla principal (Figura 4.49.). Cuando se pulsa cargar también se cierra esta ventana intermedia y aparece el dato de la ruta del fichero en el cuadro de texto de la ventana principal (Figura 4.49.).

Si el fichero de datos sólo contiene una columna la aplicación prosigue, pero en el caso de que la aplicación detecte que existe más de una columna en el fichero seleccionado se genera automáticamente una ventana (Figura 4.52.) avisando que el fichero tiene más de una columna. Esta ventana contiene un mensaje de aviso que pide la columna que contiene los datos de vibración. Esto es así porque los ficheros de captación de datos de los ensayos en ocasiones se generan con diferentes columnas que contienen además de la columna con los datos de la señal vibratoria otras columnas con otro tipo de datos como pueden ser el tiempo, el número de orden del dato,... Este es el modo que tiene la aplicación de seleccionar la columna correcta por tanto el usuario debe conocer el fichero que se va a analizar.

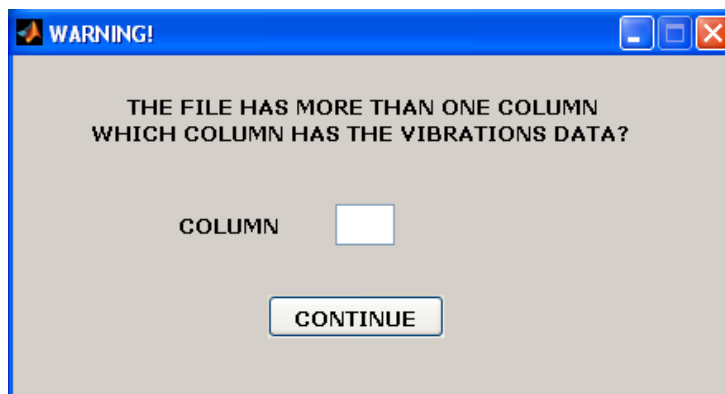


Figura 4.52. Fichero con más de una columna.

Para continuar con el análisis simplemente hay que introducir la columna en la que se encuentran los datos de la señal adquirida en el ensayo.

Si se pulsa el botón “CONTINUE” sin haber escrito el número de columna el programa lanza un mensaje de error a través de una ventana que avisa de la necesidad de escribir el número de columna. Figura 4.53.

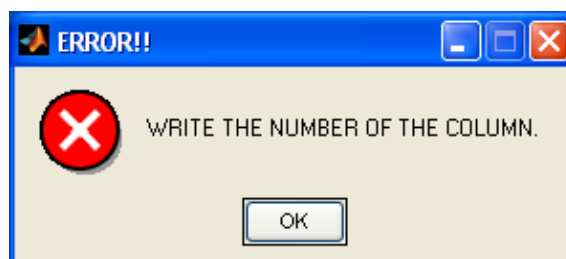


Figura 4.53. Mensaje de error.

Una vez introducido el número de la columna la aplicación chequea que exista ese número de columna, es decir, si se ha introducido en el cuadro de texto un valor de columna superior al número de columnas que contiene el fichero seleccionado. Cuando esto ocurre se lanza otra ventana de aviso que advierte de la situación. Figura 4.54.

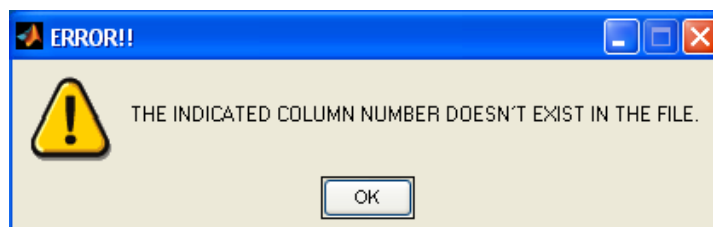


Figura 4.54. Mensaje de aviso.

Si el dato de la columna introducido cumple los requisitos, se cierra la ventana al pulsar el botón “CONTINUE” y se vuelve a la ventana principal (Figura 4.49.).

El siguiente dato necesario para continuar con el análisis de la señal es la frecuencia de muestreo de la señal que se va a estudiar, simplemente hay que introducir el dato en el cuadro de texto por teclado y en Hz.

Al llegar a este punto, el programa ya dispone de los inputs necesarios para comenzar el análisis, solo habrá que pulsar el botón de “ANALYZE” y esperar la siguiente ventana. Si no se rellena alguno de estos dos datos descritos anteriormente al pulsar el botón de “ANALYZE” se dispara una ventana de error que advierte que es necesario introducir todos los datos del análisis. Figura 4.55.

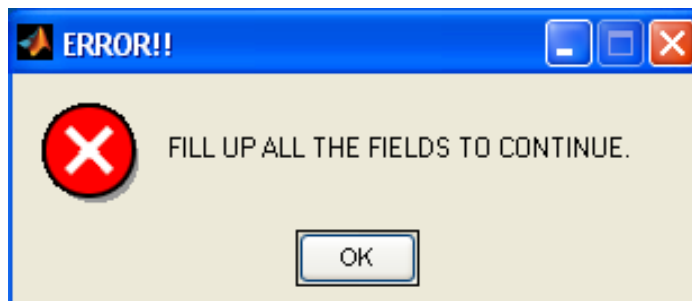


Figura 4.55. Mensaje de error por datos insuficientes.

Una vez rellenos los dos datos necesarios para el análisis la ventana se presenta de una forma similar a la siguiente, Figura 4.56.

Se observa que también tiene las opciones de salir del programa o volver a la pantalla anterior.

La opción representada en el botón llamado “EXIT” termina la aplicación y el botón “BACK” cierra esta ventana y vuelve al inicio de la aplicación (Figura 4.48.).

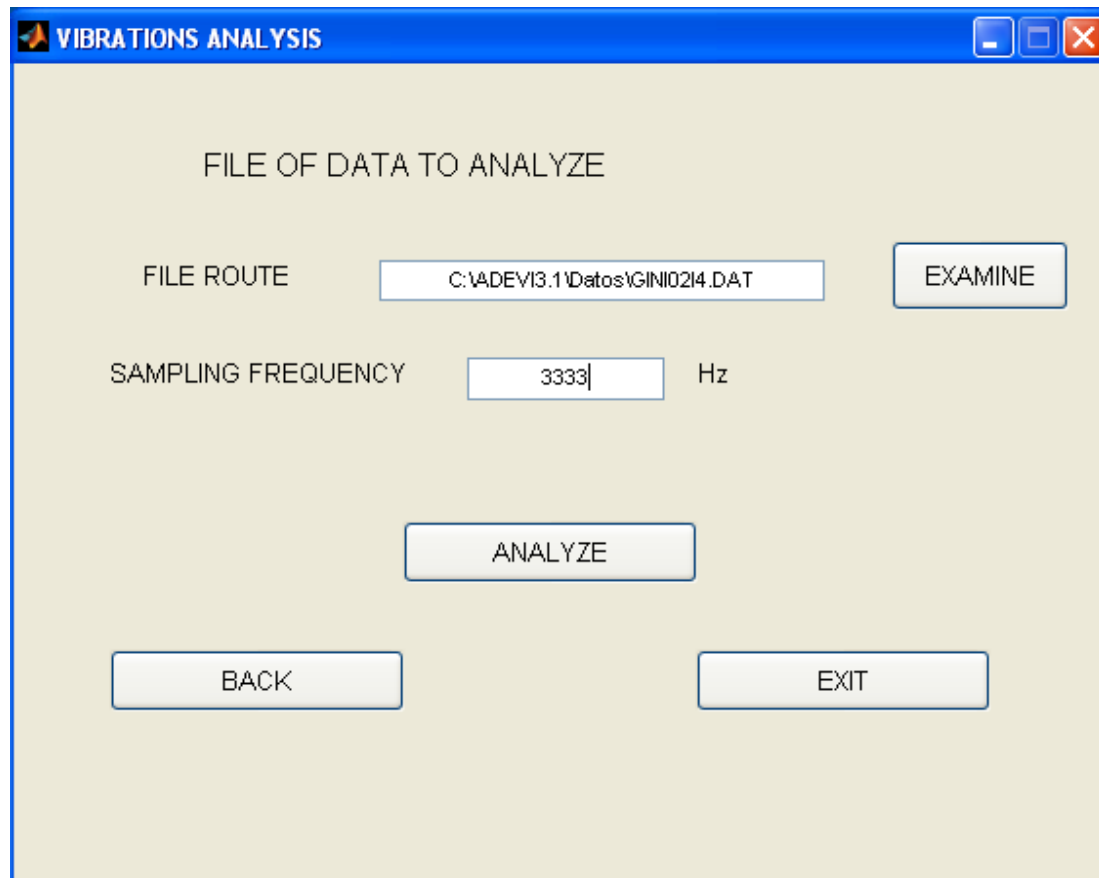


Figura 4.56. Ventana inicial del análisis de vibraciones con datos.

OPCIONES DE ESTUDIO DEL ENSAYO REALIZADO

Cuando la aplicación ya dispone de los datos del análisis, se pasa a la siguiente ventana (Figura 4.57.) que consta de dos opciones principales. Estas dos opciones equivalen a los dos tipos de resultados que la aplicación da para el fichero de datos introducido.

- *Gráficas:* Esta opción permite visualizar los resultados gráficos del análisis de la señal mediante las diferentes gráficas: PSD, Señal Temporal, Envolvente de la señal, Espectro de la Envolvente,... Todas estas gráficas se explican en detalle más adelante.
- *Datos Estadísticos:* Visualiza los datos estadísticos más importantes del ensayo, así como una representación gráfica de un histograma normalizado.

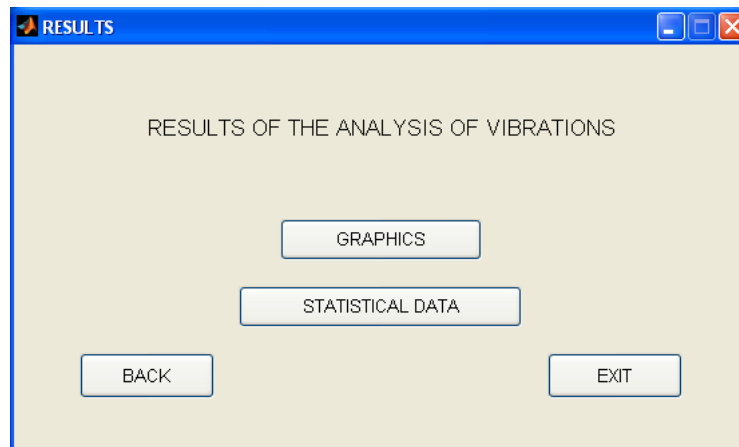


Figura 4.57. Ventana opción de resultados.

STATISTICAL DATA

Al elegir esta opción, se abre una ventana en la que con una serie de cuadros de texto en los que, en principio, no aparece ningún dato, el único cuadro de texto editable relleno es el que indica el fichero que se está estudiando. Figura 4.58.

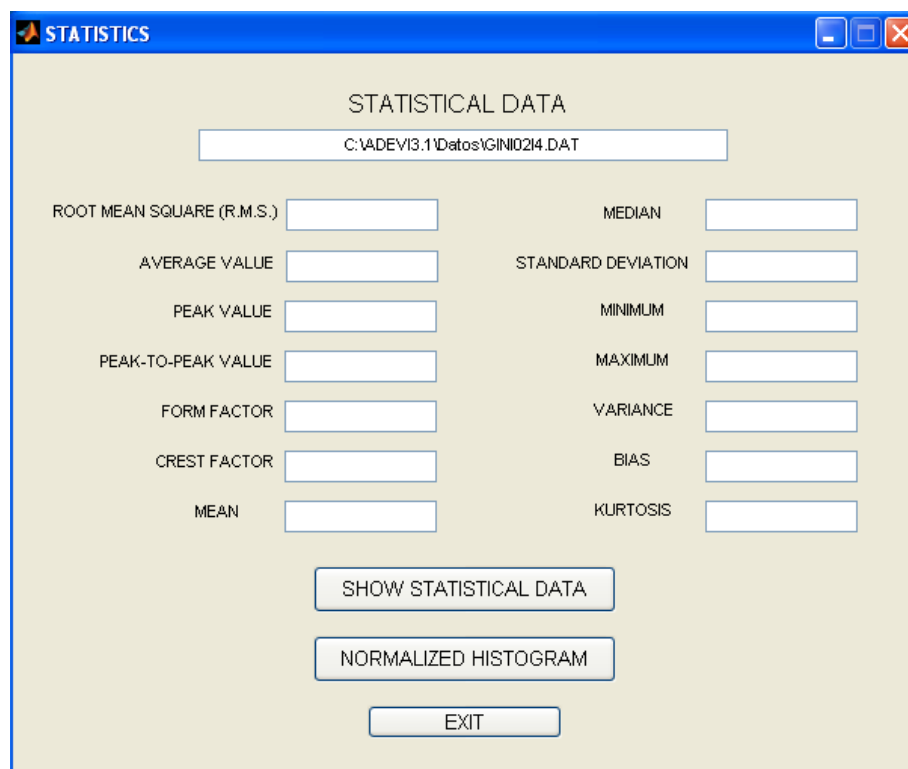


Figura 4.58. Resumen datos estadísticos del ensayo.

Si se pulsa el botón “EXIT” se cierra esta ventana activa, pero no el programa porque ésta es una rama secundaria del programa principal que sigue activo en la pantalla de la Figura 4.57.

Al pulsar el botón “SHOW STATISTICAL DATA” se generan los valores de los datos estadísticos representados en los cuadros de texto (media, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo,...). Figura 4.59.

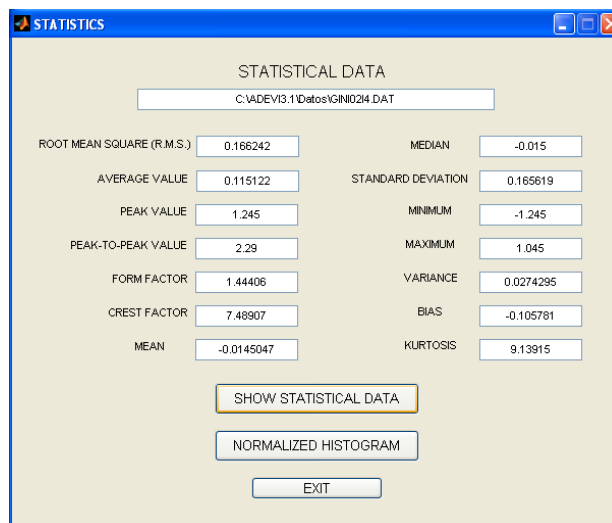


Figura 4.59. Resumen datos estadísticos del ensayo con valores.

Para obtener el gráfico del histograma normalizado hay que pulsar el botón llamado “NORMALIZED HISTOGRAM”, este histograma se da en tanto por uno, el valor central o media será cero y el intervalo de [-1,1]. El gráfico generado posee herramientas de edición de gráficos que permiten grabarlo, imprimirlo, realizar zoom,...

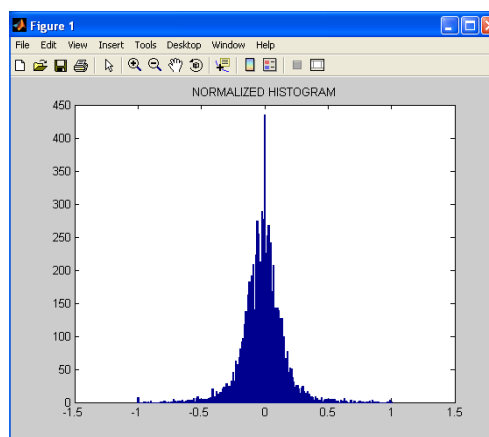


Figura 4.60. Histograma del ensayo.

Este tipo de ventanas también se pueden cerrar independientemente ya que la pantalla de la Figura 4.57., se mantiene en segundo plano siempre mientras se realizan acciones sobre la gráfica editada.

GRAPHICS

Esta opción da paso a una ventana que consta de una serie de botones que representan los principales métodos de análisis de vibraciones que se analizan en la aplicación ADEVI3.1. (PSD, Señal temporal, Envolvente, Espectro de la Envolvente, Espectrograma y Wavelet). Figura 4.61.

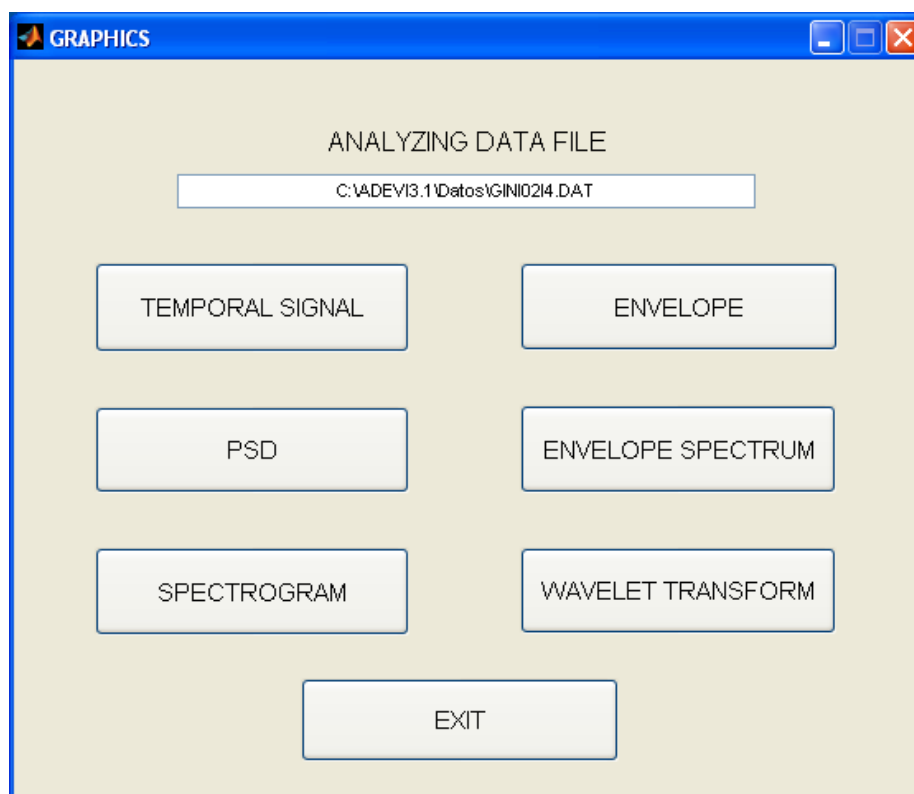


Figura 4.61. Resumen de gráficas del ensayo.

Si se pulsa el botón “EXIT”, se cierra esta ventana, pero no el programa.

Para visualizar cualquiera de estas gráficas basta con pulsar el botón correspondiente. Con esta acción se obtiene una representación gráfica en una pantalla independiente. El cuadro de texto de la parte superior de la ventana identifica en cada momento el fichero al que corresponde la señal que se está analizando, que es el seleccionado al comienzo de este módulo.

TEMPORAL SIGNAL

Si se selecciona el botón de “TEMPORAL SIGNAL” aparece la siguiente ventana. Figura 4.62.

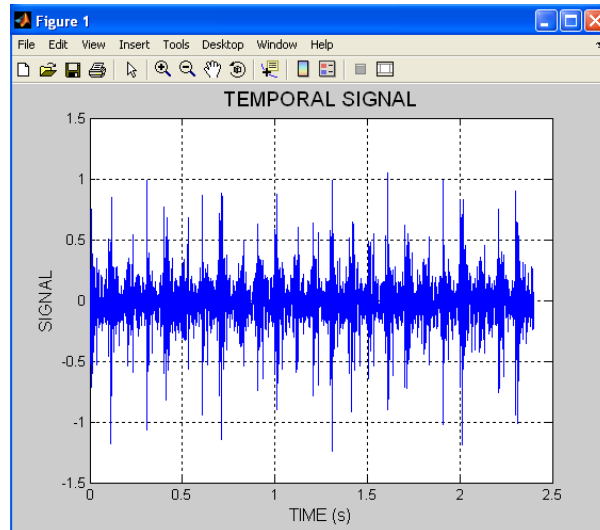


Figura 4.62. Gráfica de la señal temporal.

ENVELOPE

Si, en cambio, se selecciona el botón “ENVELOPE” aparecería otra ventana similar, pero con la gráfica de la envolvente. Figura 4.63.

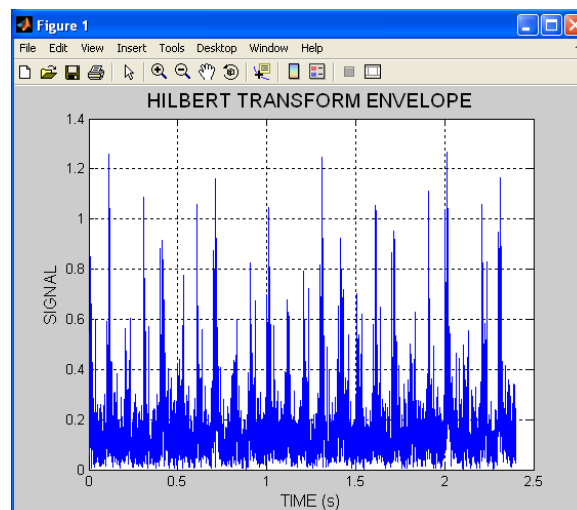


Figura 4.63. Gráfica de la envolvente.

PSD

Si, en cambio, se quiere ver la gráfica “PSD”. Figura 4.64.

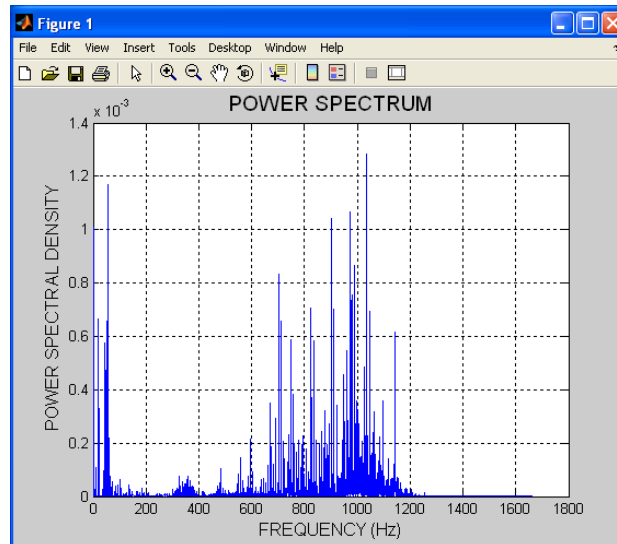


Figura 4.64. Gráfica de la “PSD”.

ENVELOPE SPECTRUM

Si se pulsa el botón de “ENVELOPE SPECTRUM”, se vería lo que aparece en la Figura 4.65.

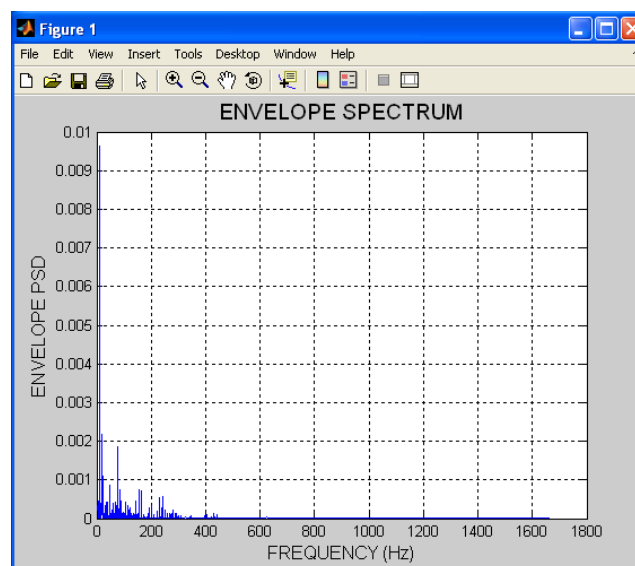


Figura 4.65. Gráfica del espectro envolvente.

SPECTROGRAM

Pulsando el botón “SPECTROGRAM”, se obtiene la siguiente gráfica, Figura 4.66.

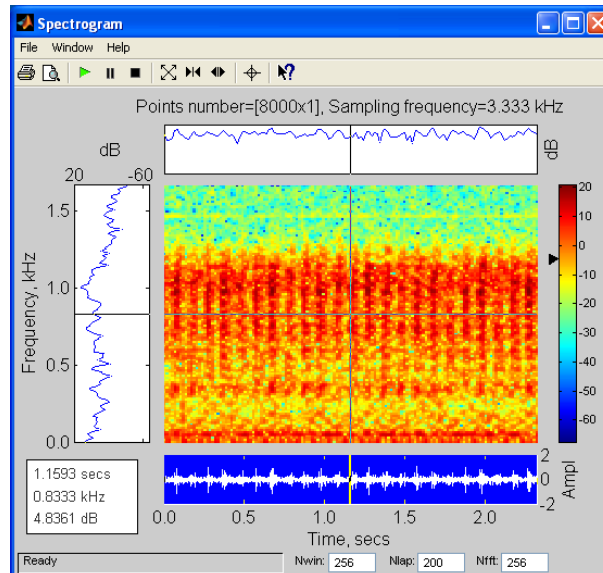


Figura 4.66. Gráfica del espectrograma.

WAVELET

Al pulsar el botón “WAVELET TRANSFORM” no aparece la gráfica inmediatamente como ocurría con las anteriores gráficas, sino que aparece una ventana pidiendo datos, que son necesarios para obtener su gráfica. Figura 4.67.

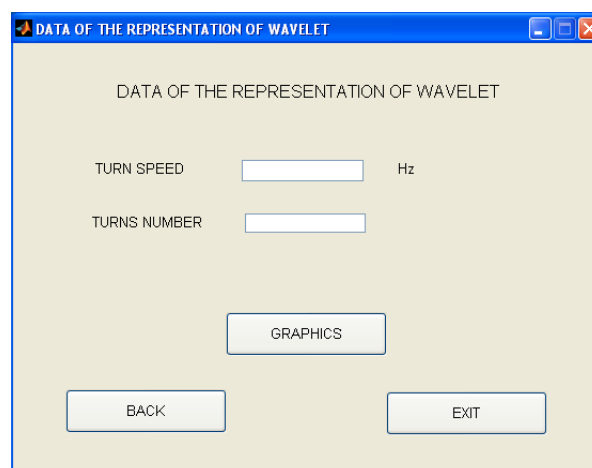


Figura 4.67. Datos Transformada Wavelet.

Si se pulsa el botón “EXIT”, se sale de la pantalla activa, pero no de la aplicación ADEVI3.1 porque hay ventanas abiertas (Figuras 4.57. y 4.61.).

Si se pulsa el botón “BACK” se vuelve a la pantalla de la Figura 4.61.

Si se pulsa el botón “GRAPHICS” sin haber introducido uno o ninguno de los datos aparece un mensaje de error (igual que el de la Figura 4.55.). Pero, si se han introducido ambos datos (velocidad de giro y número de vueltas), que en este caso se pondrá el valor de velocidad de giro 10 Hz y como número de vueltas 3, el programa abre otra ventana que es la Figura 4.68.

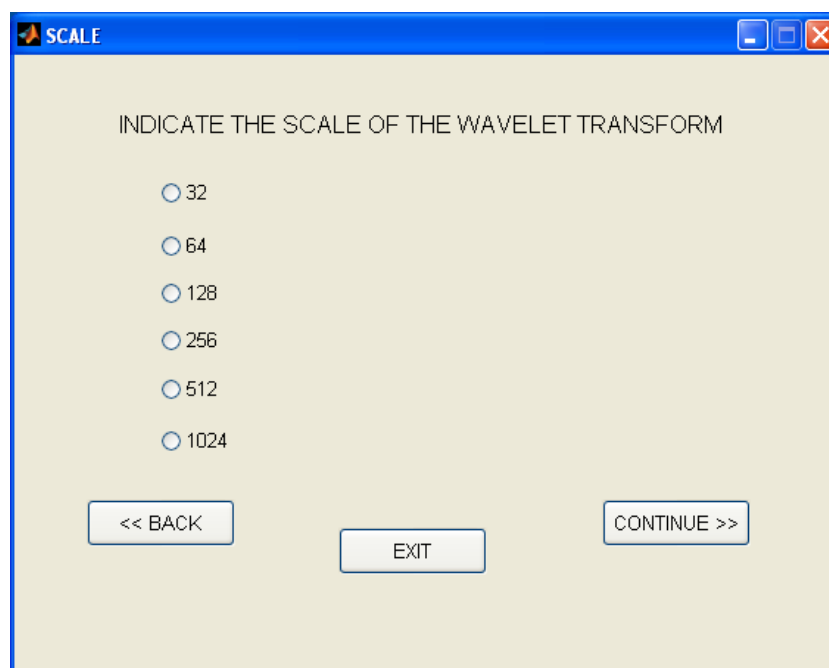


Figura 4.68. Elección de escala de la Transformada Wavelet.

Si no se selecciona ninguna escala y se pulsa “CONTINUAR” aparece la siguiente pantalla de ¡¡ERROR!! Figura 4.69.

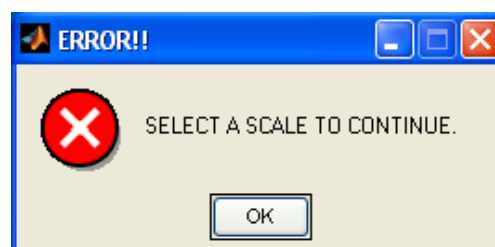


Figura 4.69. Pantalla de error por no seleccionar una escala.

Una vez seleccionado la escala, el siguiente paso es elegir la Wavelet madre que se desea para la transformación. Para ello se pasa a una ventana que consta de un número de botones en los cuales se escribe el nombre del tipo de la Wavelet (Figura 4.70.). Si ésta es de orden único, pasará directamente a lanzarse la gráfica en una pantalla independiente con las herramientas necesarias para su edición. (Figura 4.71.).

Si por el contrario la Wavelet tiene varias órdenes, se dará paso a otra ventana en la que se pide el número de orden que se desea (Figura 4.72.), tras lo cual irá directamente la pantalla con la representación gráfica (Figura 4.73.).

Las Wavelet madres que tienen varias órdenes son Daubechies (Figura 4.72.), Symlet (Figura 4.74.), Coiflet (Figura 4.75.) y Biortogonal (Figura 4.76.). A continuación se muestran las pantallas donde te indican el número de orden que tiene cada una, aunque la representación gráfica solamente se hará en el caso de Daubechies porque la ventana es igual en todos los casos.



Figura 4.70. Elección de Wavelet madre.

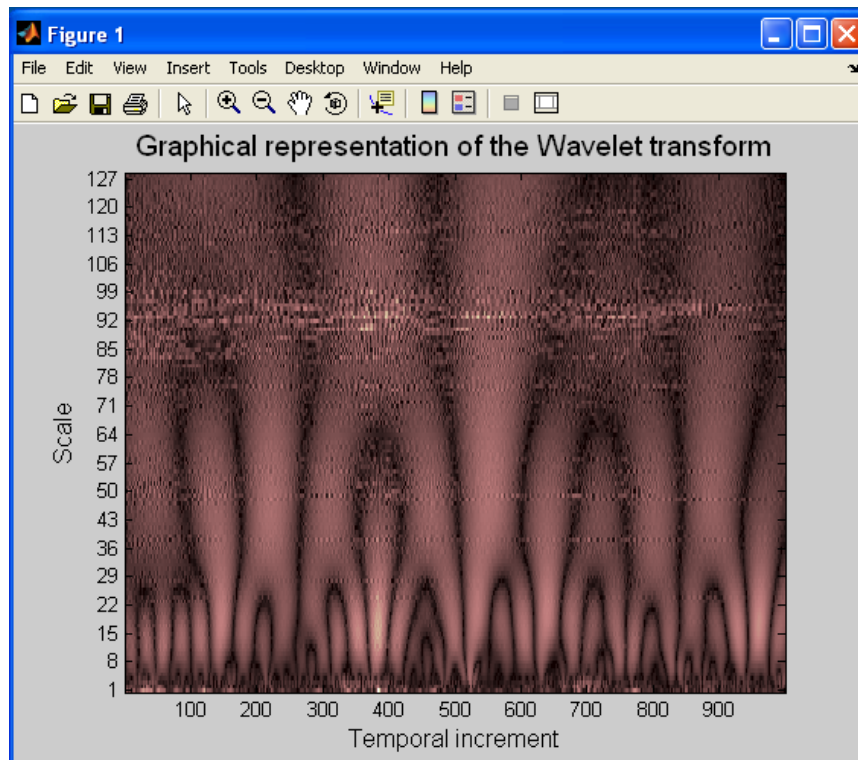


Figura 4.71. Mexican Hat representación de Wavelet de orden único con escala 128.

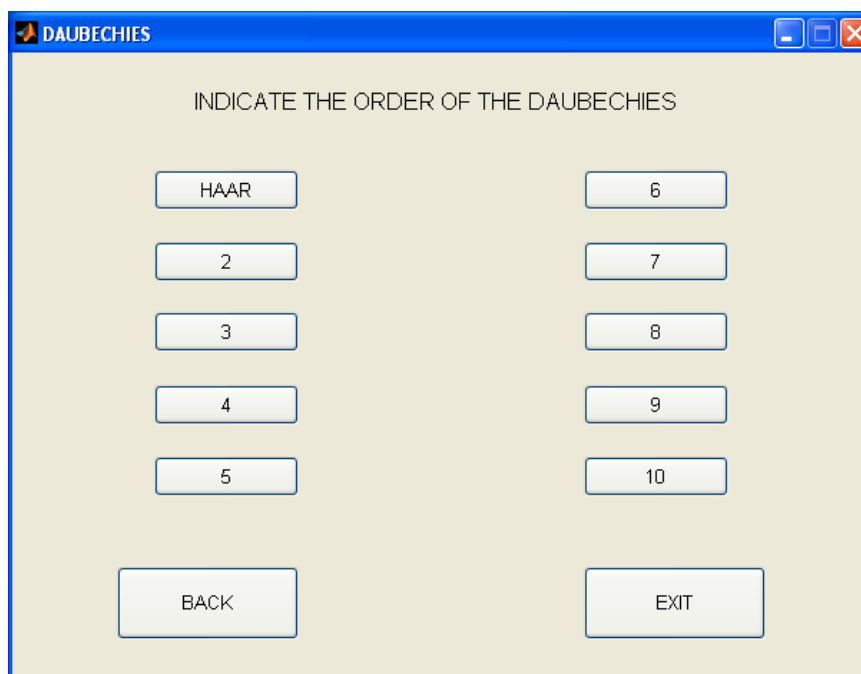


Figura 4.72. Elección del orden de una Daubechies como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

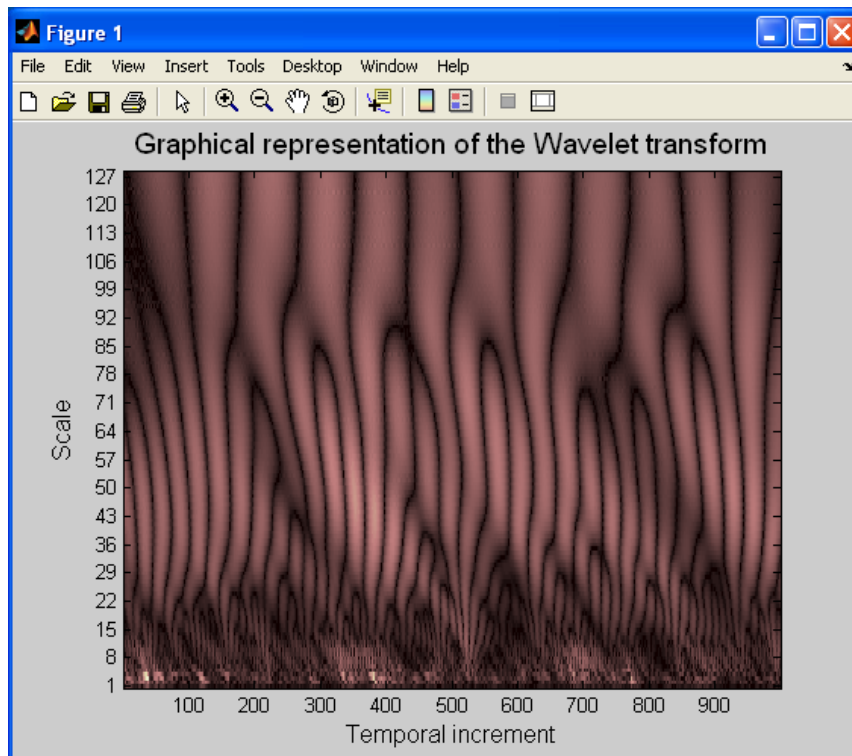


Figura 4.73. Daubechies como representación de Wavelet de orden ocho con escala 128.

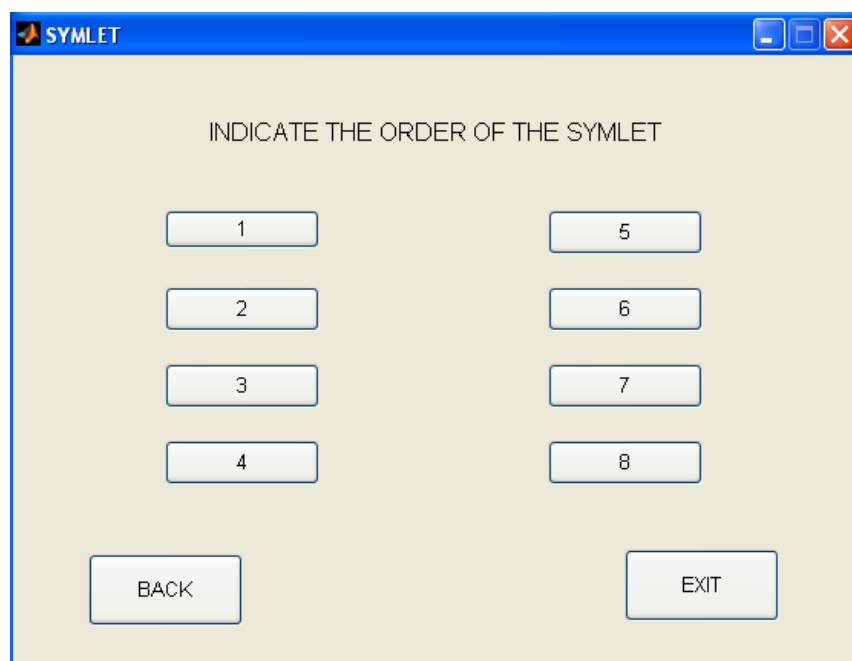


Figura 4.74. Elección del orden de una Symlet como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

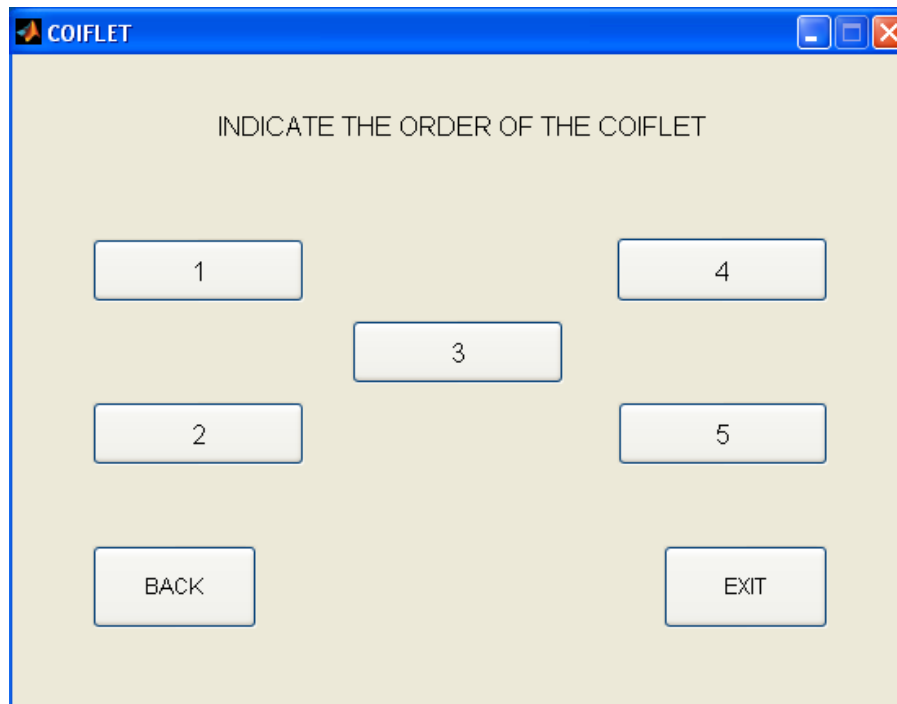


Figura 4.75. Elección del orden de una Coiflet como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

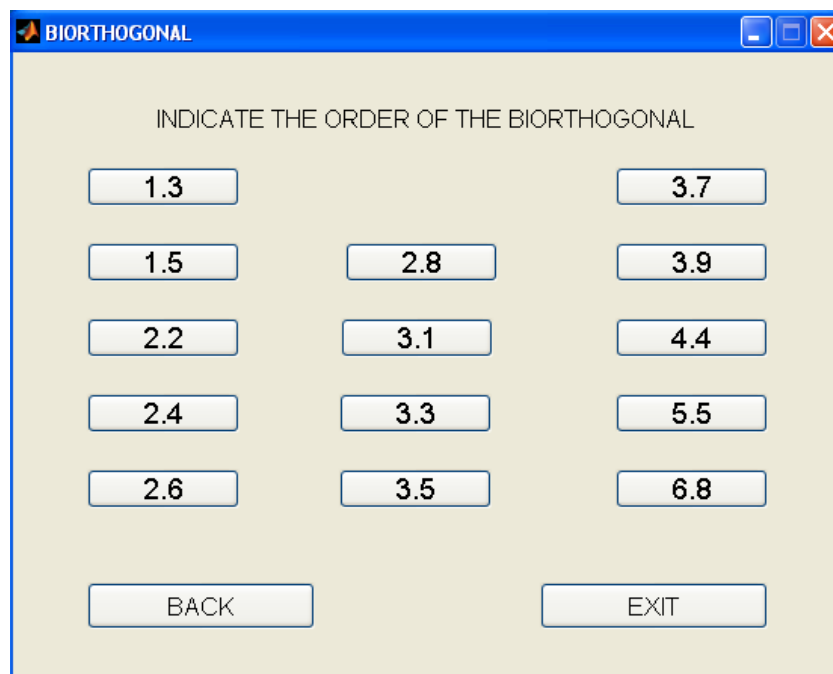


Figura 4.76. Elección del orden de una Biorthogonal como ejemplo de una Wavelet con varias órdenes.

3.2.4. Simulation of vibrations in rolling bearings

El segundo subprograma del que se compone la aplicación es la simulación de vibraciones por defectos en rodamientos, este módulo se selecciona desde la ventana de inicio de la aplicación general (Figura 4.48.), pulsando el botón llamado “SIMULATION OF VIBRATIONS IN ROLLING BEARINGS”.

SELECCIÓN DEL DEFECTO

Una vez pulsado el botón “SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS” aparece la primera pantalla propia del segundo módulo de la aplicación ADEVI3.1. Figura 4.77.

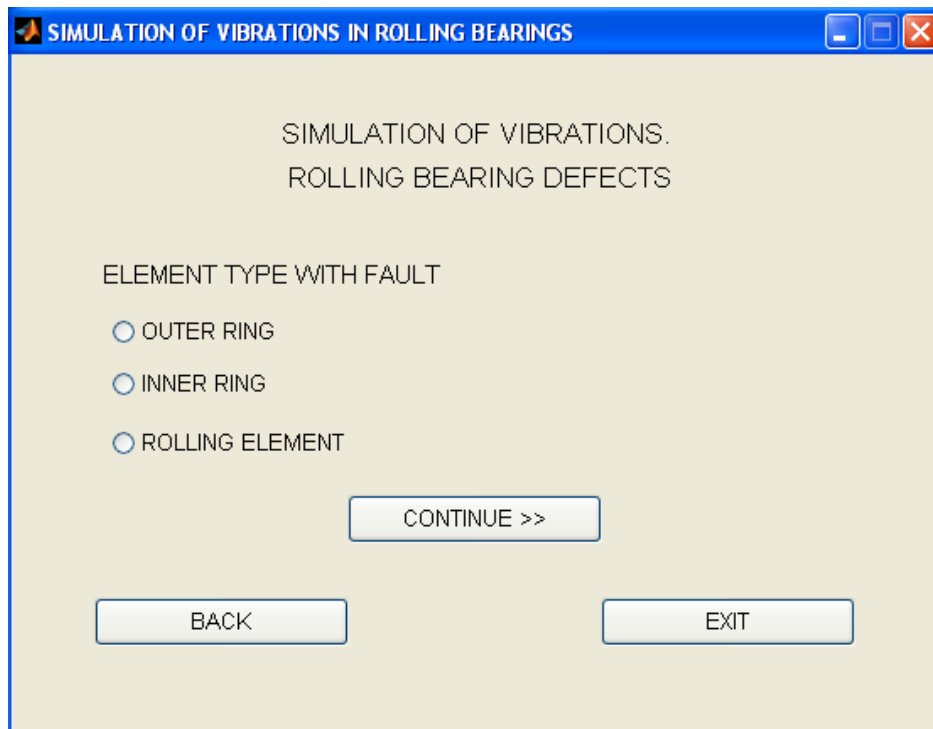


Figura 4.77. Pantalla inicial de la simulación de vibraciones en rodamientos.

Esta pantalla contiene las opciones posibles de defectos en los rodamientos que se estudian en esta aplicación. Éstas son:

- Defecto en anillo interno.
- Defecto en anillo externo.
- Defecto en el elemento rodante.

Para acceder a cada una de ellas es necesario seleccionarla, son excluyentes entre sí. Una vez seleccionada una de las tres, se pulsa el botón “CONTINUE >>”. Esta ventana también posee las opciones de volver atrás, que lleva a la ventana de inicio de la aplicación (Figura 4.48.) y la opción de salir que cierra la aplicación.

En cada uno de los tres tipos de defecto descritos se accede a una pantalla en la que es necesario introducir una serie de parámetros para simular el defecto. Estos datos han de ser conocidos por el usuario y se agrupan en cuatro grandes bloques:

- A. Características de la muestra. Son los datos de la señal, en este caso son la frecuencia de muestreo y el número de puntos del ensayo.
- B. Características del sistema. Engloba los parámetros del sistema como son el coeficiente de amortiguamiento de la máquina (α), f_0 que es la frecuencia natural de la máquina o frecuencia de resonancia del rodamiento, y la amplitud y frecuencia de un defecto de desalineamiento, denominados f_1 y A_1 . También se incluye la velocidad de giro.
- C. Características del rodamiento. Los parámetros propios del rodamiento, estos son el diámetro medio del rodamiento, D_m , el diámetro del elemento rodante, D_b , el ángulo de contacto del rodamiento y el número de elementos rodantes, Z .
- D. Características del defecto. Finalmente se contemplan los parámetros del defecto de los rodamientos tales como la amplitud y frecuencia de un defecto en la pista interior de un rodamiento, A_i y f_i , el tamaño de defecto, zona de carga, etc.

Si al pulsar el botón “CONTINUE>>” sin haber seleccionado un tipo aparece el siguiente mensaje de ¡¡ERROR!! (Figura 4.78.)

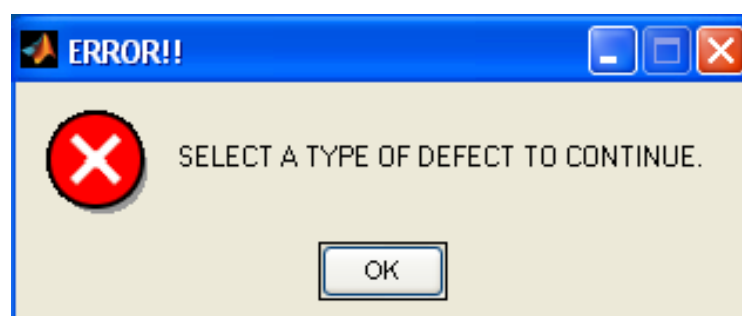
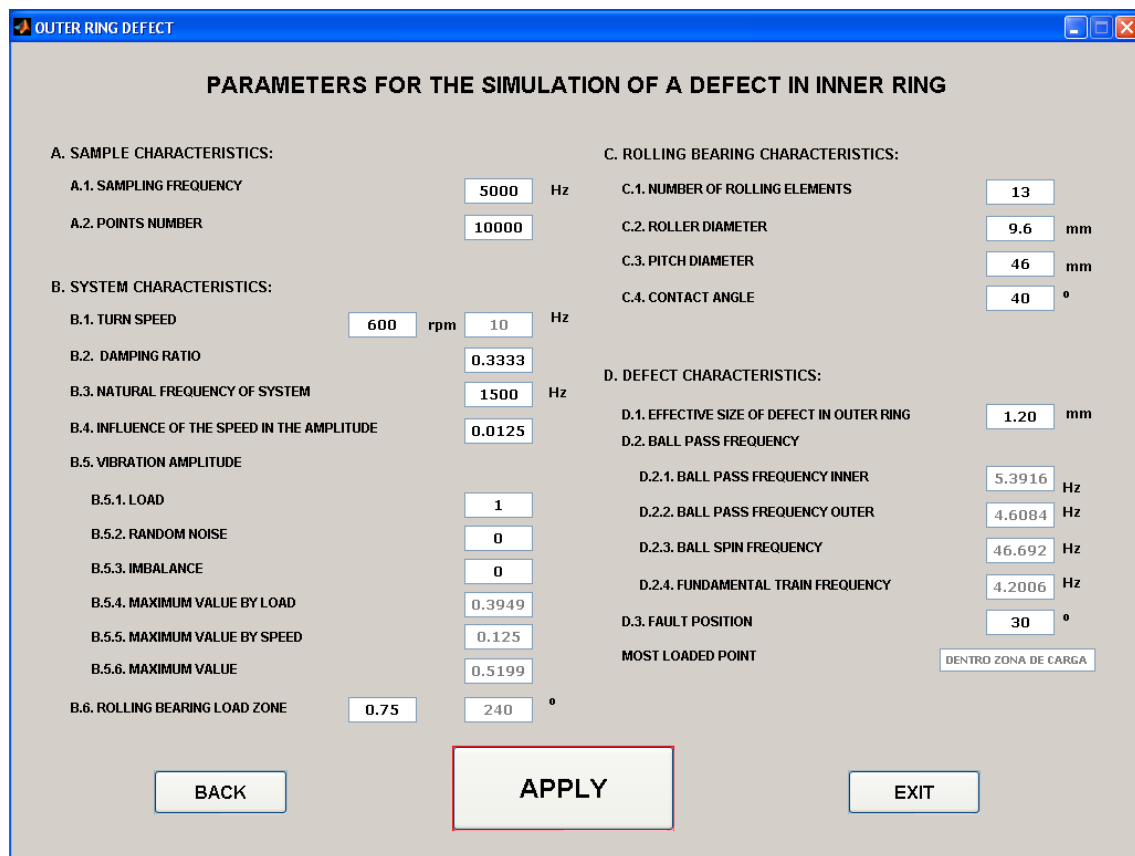


Figura 4.78. Mensaje de error.

OUTER RING DEFECT

La pantalla de este subprograma contiene una serie de cuadros de texto divididos en los grupos mencionados anteriormente; características de la muestra, del sistema, del rodamiento y del defecto. Estos datos presentan unos valores por defecto que se podrán modificar para representar las gráficas de defectos para el ensayo requerido. La frecuencia de giro en el anillo interior, así como la amplitud por defecto de la velocidad y la frecuencia de paso son datos que no son susceptibles de ser cambiados por teclado, dependen de otros parámetros. Cambiarán automáticamente al cambiar alguno de los parámetros de los que depende.

Para que todos los cambios que se realicen sean efectivos es necesario pulsar el botón “APLICAR”. Figura 4.79.



PARAMETERS FOR THE SIMULATION OF A DEFECT IN INNER RING			
A. SAMPLE CHARACTERISTICS:			
A.1. SAMPLING FREQUENCY	5000	Hz	
A.2. POINTS NUMBER	10000		
B. SYSTEM CHARACTERISTICS:			
B.1. TURN SPEED	600	rpm	10 Hz
B.2. DAMPING RATIO	0.3333		
B.3. NATURAL FREQUENCY OF SYSTEM	1500	Hz	
B.4. INFLUENCE OF THE SPEED IN THE AMPLITUDE	0.0125		
B.5. VIBRATION AMPLITUDE			
B.5.1. LOAD	1		
B.5.2. RANDOM NOISE	0		
B.5.3. IMBALANCE	0		
B.5.4. MAXIMUM VALUE BY LOAD	0.3949		
B.5.5. MAXIMUM VALUE BY SPEED	0.125		
B.5.6. MAXIMUM VALUE	0.5199		
B.6. ROLLING BEARING LOAD ZONE	0.75		240 °
C. ROLLING BEARING CHARACTERISTICS:			
C.1. NUMBER OF ROLLING ELEMENTS	13		
C.2. ROLLER DIAMETER	9.6	mm	
C.3. PITCH DIAMETER	46	mm	
C.4. CONTACT ANGLE	40	°	
D. DEFECT CHARACTERISTICS:			
D.1. EFFECTIVE SIZE OF DEFECT IN OUTER RING	1.20	mm	
D.2. BALL PASS FREQUENCY			
D.2.1. BALL PASS FREQUENCY INNER	5.3916	Hz	
D.2.2. BALL PASS FREQUENCY OUTER	4.6084	Hz	
D.2.3. BALL SPIN FREQUENCY	46.692	Hz	
D.2.4. FUNDAMENTAL TRAIN FREQUENCY	4.2006	Hz	
D.3. FAULT POSITION	30	°	
MOST LOADED POINT			
DENTRO ZONA DE CARGA			

Buttons: BACK, APPLY, EXIT

Figura 4.79. Datos de defecto en anillo exterior.

Si se pulsa “EXIT” se sale del programa, y el botón “BACK” se vuelve a la Figura 4.77. Mientras que si se pulsa el botón “APPLY” aparece la siguiente pantalla (Figura 4.80.).

INFORMACIÓN SOBRE ANILLO EXTERIOR

Esta ventana da la opción de hacer un estudio más detallado del defecto en anillo exterior, pues permite la opción de mostrar gráficas, de guardar los datos y de hacer otros análisis (los mismos que se han hecho en el apartado “3.2.3. Análisis de vibraciones”).

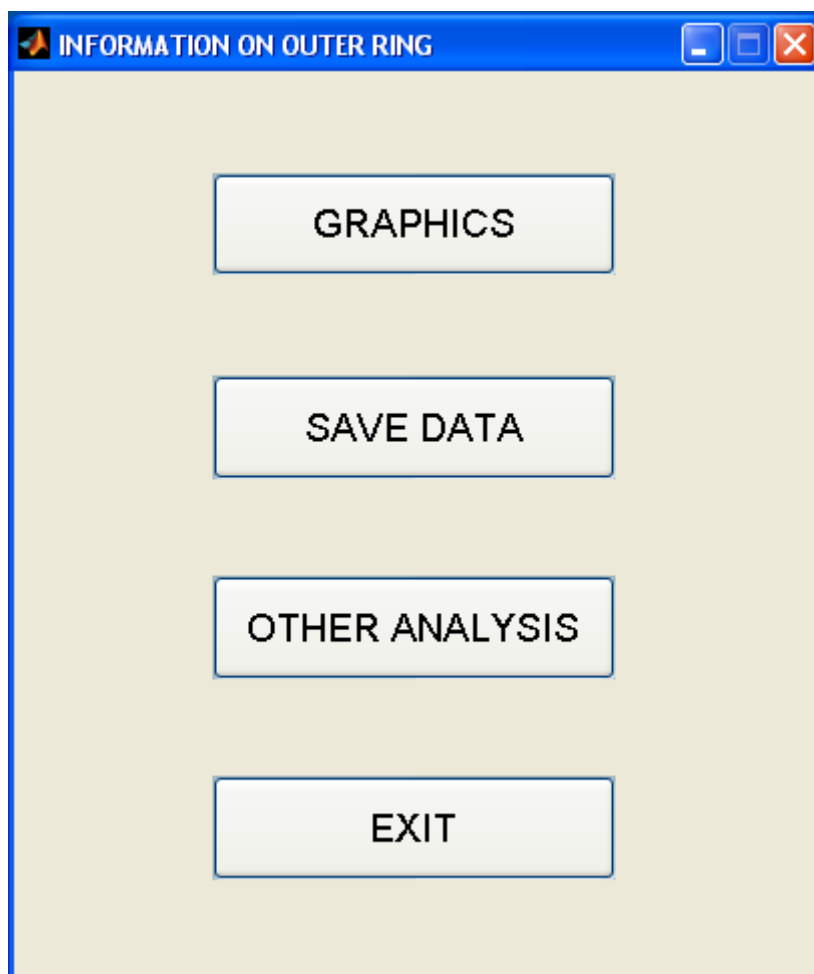


Figura 4.80. Opciones para el defecto de anillo exterior.

Si se pulsa el botón “GRAPHICS” aparecen las ventanas de la Figura 4.81. y de la Figura 4.82., pero no se cierra esta ventana (Figura.4.80.) por si se desea realizar las otras opciones, esto mismo se hace con “SAVE DATA” y “OTHER ANALYSIS”. Si se pulsa el botón “SAVE DATA”, aparecerá la ventana de la Figura 4.83. Si además quiere pulsar el botón “OTHER ANALYSIS” se va a la Figura 4.57. y continúa como se ha explicado anteriormente. Botón “EXIT” cierra esta ventana.

GRÁFICAS DEL ANILLO EXTERIOR

Una vez aplicados los cambios necesarios para visualizar las gráficas solamente faltaría pulsar el botón llamado “GRAPHICS” y, de forma automática, se generan dos figuras con las gráficas de resultados.

La primera figura se divide en dos, por un lado, la gráfica de la señal temporal emitida por un rodamiento con defecto en anillo exterior así como la envolvente de la zona de carga y, por otro, un detalle de la señal temporal anterior y la envolvente de esta señal calculada como el valor absoluto de la transformada de Hilbert. Figura 4.81.

La segunda figura también contiene dos gráficos, en el primero se representa el espectro de potencia de la señal anterior, en el último de los gráficos se representa el espectro de potencia de la envolvente. Figura 4.82.

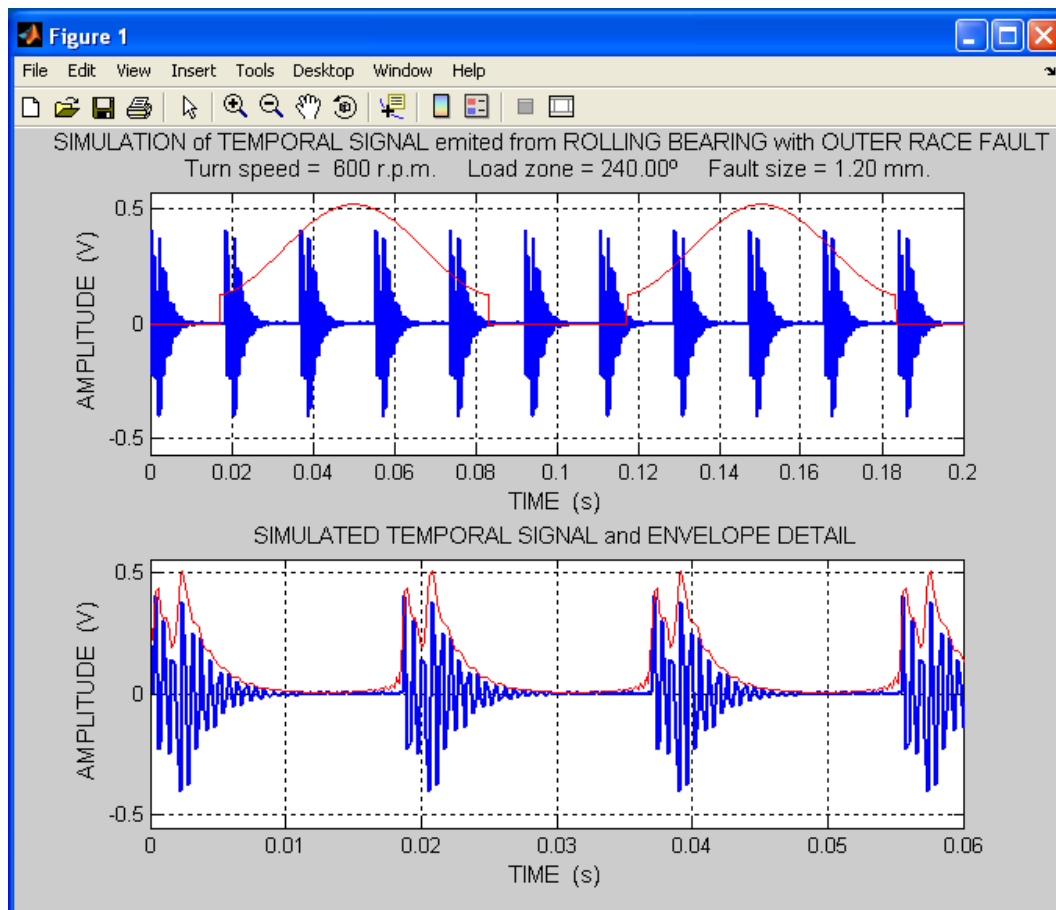


Figura 4.81. Gráfica de la señal temporal, envolvente de la zona de carga y detalle de la envolvente.

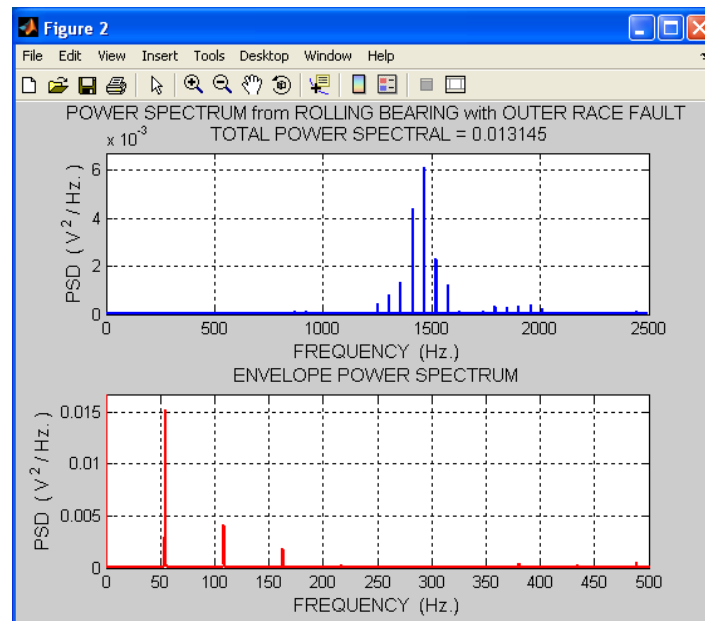


Figura 4.82. Espectro de potencia y espectro de potencia de la envolvente de la señal.

GUARDAR DATOS DEL ANILLO EXTERIOR

Antes de dar al botón de “SAVE DATA” se escribe el nombre del archivo y se selecciona la ruta donde desee que se encuentre el archivo. Figura 4.83.

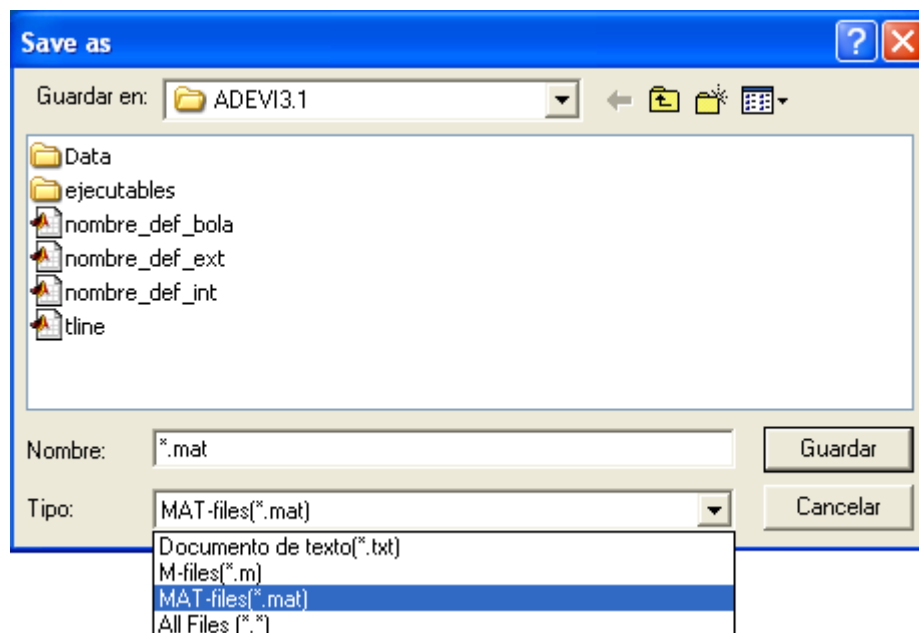
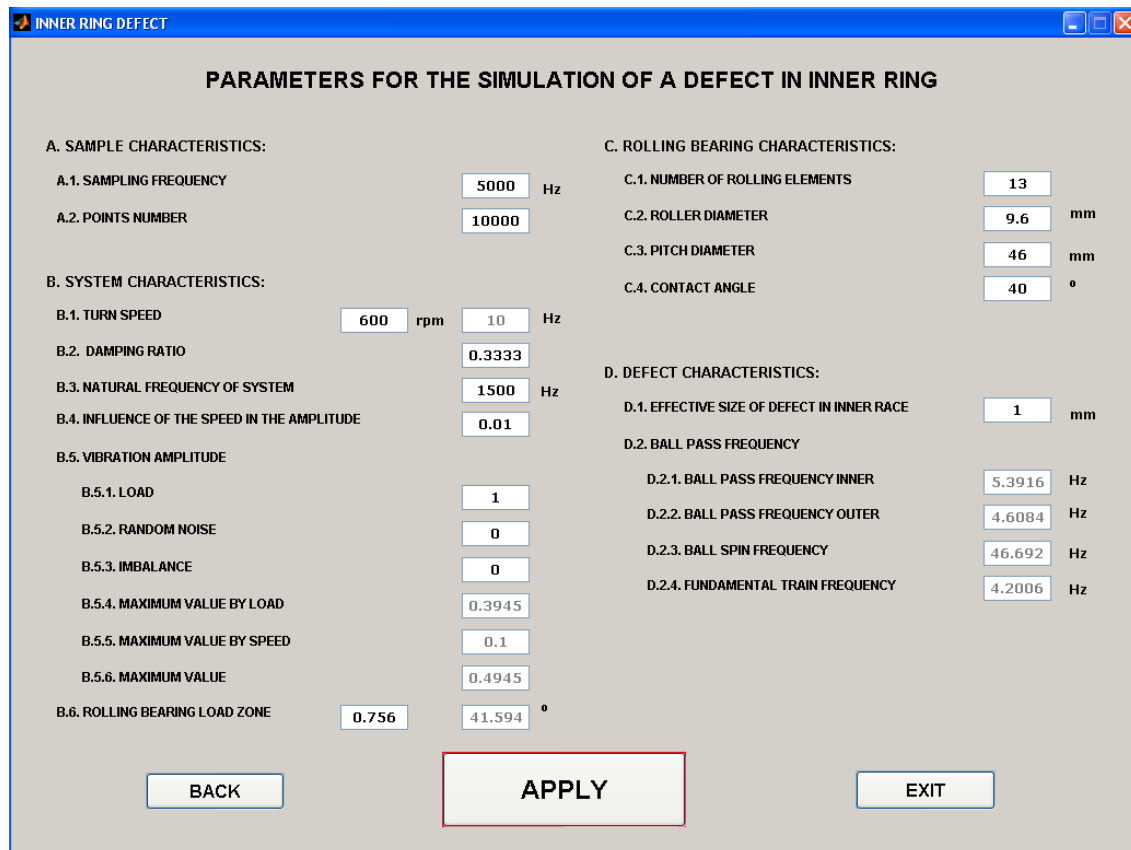


Figura 4.83. Pantalla para guardar datos.

INNER RING DEFECT

Esta opción permite estudiar los defectos del anillo interior de un rodamiento, conocidos una serie de parámetros, Figura 4.84. Estos parámetros se introducen en la misma pantalla de entrada de datos y se dividen en los cuatro grandes grupos, similares a los parámetros en anillo exterior.



PARAMETERS FOR THE SIMULATION OF A DEFECT IN INNER RING			
A. SAMPLE CHARACTERISTICS:			
A.1. SAMPLING FREQUENCY	5000	Hz	
A.2. POINTS NUMBER	10000		
B. SYSTEM CHARACTERISTICS:			
B.1. TURN SPEED	600	rpm	10 Hz
B.2. DAMPING RATIO	0.3333		
B.3. NATURAL FREQUENCY OF SYSTEM	1500	Hz	
B.4. INFLUENCE OF THE SPEED IN THE AMPLITUDE	0.01		
B.5. VIBRATION AMPLITUDE			
B.5.1. LOAD	1		
B.5.2. RANDOM NOISE	0		
B.5.3. IMBALANCE	0		
B.5.4. MAXIMUM VALUE BY LOAD	0.3945		
B.5.5. MAXIMUM VALUE BY SPEED	0.1		
B.5.6. MAXIMUM VALUE	0.4945		
B.6. ROLLING BEARING LOAD ZONE	0.756		41.594 °
C. ROLLING BEARING CHARACTERISTICS:			
C.1. NUMBER OF ROLLING ELEMENTS	13		
C.2. ROLLER DIAMETER	9.6	mm	
C.3. PITCH DIAMETER	46	mm	
C.4. CONTACT ANGLE	40	°	
D. DEFECT CHARACTERISTICS:			
D.1. EFFECTIVE SIZE OF DEFECT IN INNER RACE	1	mm	
D.2. BALL PASS FREQUENCY			
D.2.1. BALL PASS FREQUENCY INNER	5.3916	Hz	
D.2.2. BALL PASS FREQUENCY OUTER	4.6084	Hz	
D.2.3. BALL SPIN FREQUENCY	46.692	Hz	
D.2.4. FUNDAMENTAL TRAIN FREQUENCY	4.2006	Hz	

Buttons: BACK, APPLY, EXIT

Figura 4.84. Datos de defectos en anillo interior.

Si se pulsa el botón “APPLY” se pasa a otra ventana (Figura 4.85.).

INFORMACIÓN SOBRE ANILLO INTERIOR

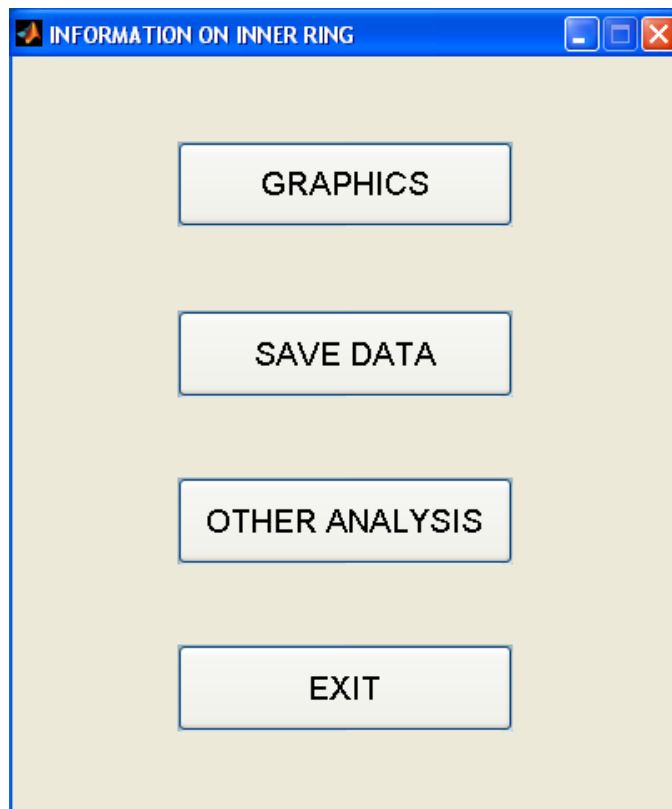


Figura 4.85. Opciones para el defecto en anillo interior.

Si se pulsa el botón “GRAPHICS” aparecen las ventanas de la Figura 4.86. y de la Figura 4.87., pero no se cierra esta ventana por si se desea realizar las otras opciones, esto mismo se hace con “SAVE DATA” y “OTHER ANALYSIS”. Si desea guardar datos se pulsará el botón “SAVE DATA” y aparecerá la misma ventana de la Figura 4.83. Si además quiere pulsar el botón “OTHER ANALYSIS” se va a la Figura 4.57. y continúa como se ha explicado anteriormente. Botón “EXIT” cierra esta ventana.

GRÁFICAS DEL ANILLO INTERIOR

Se generan dos figuras, en la primera de ellas se representa la gráfica de la señal temporal emitida por un rodamiento con defecto en anillo interior así como la envolvente de la zona de carga y por otro lado un detalle de la señal temporal y la envolvente de esta señal. Figura 4.86.

En la segunda figura se representa el espectro de potencia de la señal anterior, y el espectro de potencia de la envolvente. Figura 4.87.

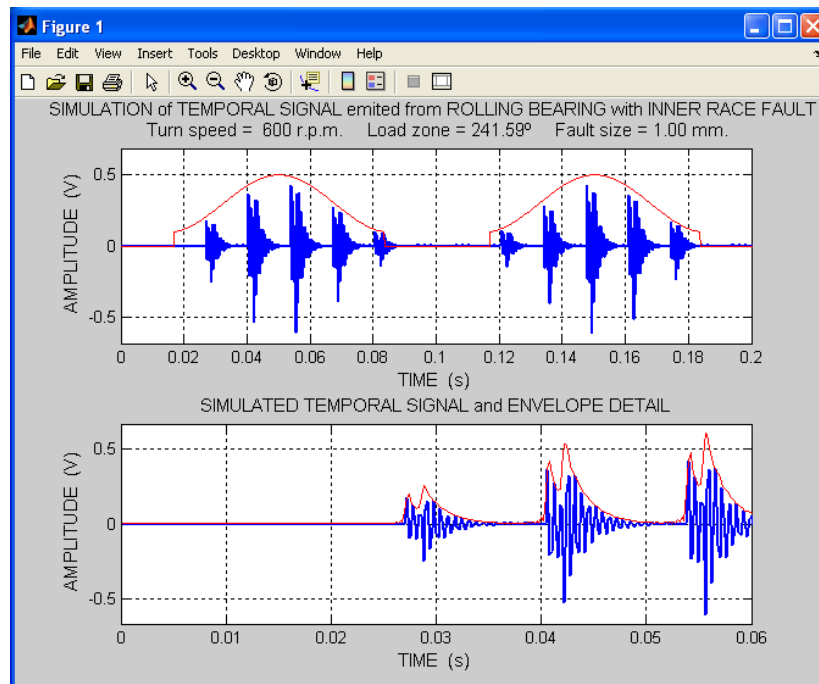


Figura 4.86. Gráfica de la señal temporal, envolvente de la zona de carga y detalle de la envolvente.

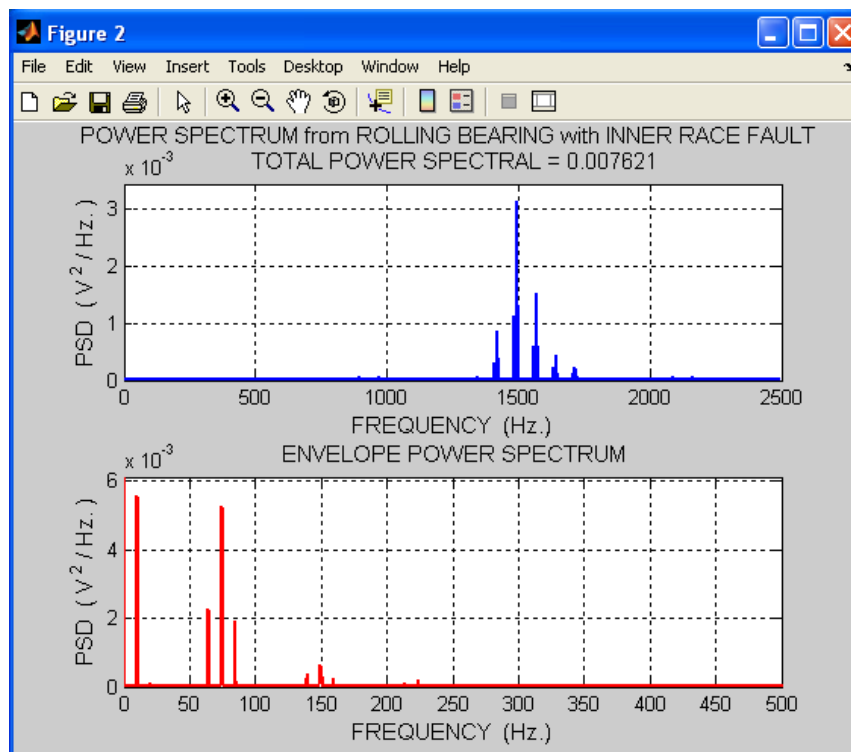
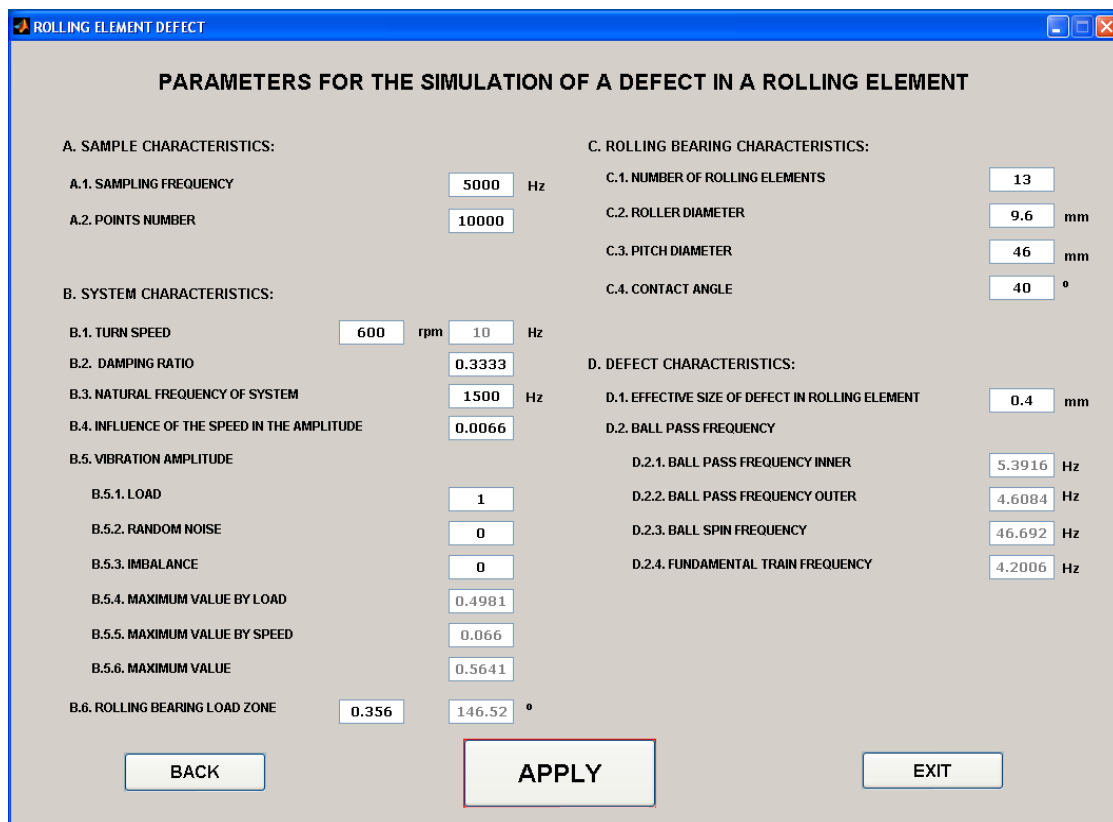


Figura 4.87. Espectro de potencia y espectro de potencia de la envolvente de la señal.

ROLLING ELEMENT DEFECT

Se accede a una ventana (Figura 4.88.) con múltiples cuadros de texto, en principio, vienen rellenos con unos parámetros por defecto que son susceptibles de cambiarse. Pero no todos los datos son independientes, el valor de la frecuencia de giro del anillo interior depende de otros parámetros introducidos, lo mismo ocurre con la frecuencia de defecto en jaula y la frecuencia de paso, al igual que en los defectos anteriores estos datos aparecen sombreados y no se pueden editar, cambian de valor al modificar alguno de los parámetros de los que depende y al pulsar el botón de “APPLY”.



PARAMETERS FOR THE SIMULATION OF A DEFECT IN A ROLLING ELEMENT			
A. SAMPLE CHARACTERISTICS:			
A.1. SAMPLING FREQUENCY	5000	Hz	
A.2. POINTS NUMBER	10000		
B. SYSTEM CHARACTERISTICS:			
B.1. TURN SPEED	600	rpm	10 Hz
B.2. DAMPING RATIO	0.3333		
B.3. NATURAL FREQUENCY OF SYSTEM	1500	Hz	
B.4. INFLUENCE OF THE SPEED IN THE AMPLITUDE	0.0066		
B.5. VIBRATION AMPLITUDE			
B.5.1. LOAD	1		
B.5.2. RANDOM NOISE	0		
B.5.3. IMBALANCE	0		
B.5.4. MAXIMUM VALUE BY LOAD	0.4981		
B.5.5. MAXIMUM VALUE BY SPEED	0.066		
B.5.6. MAXIMUM VALUE	0.5641		
B.6. ROLLING BEARING LOAD ZONE	0.356	146.52	°
C. ROLLING BEARING CHARACTERISTICS:			
C.1. NUMBER OF ROLLING ELEMENTS	13		
C.2. ROLLER DIAMETER	9.6	mm	
C.3. PITCH DIAMETER	46	mm	
C.4. CONTACT ANGLE	40	°	
D. DEFECT CHARACTERISTICS:			
D.1. EFFECTIVE SIZE OF DEFECT IN ROLLING ELEMENT	0.4	mm	
D.2. BALL PASS FREQUENCY			
D.2.1. BALL PASS FREQUENCY INNER	5.3916	Hz	
D.2.2. BALL PASS FREQUENCY OUTER	4.6084	Hz	
D.2.3. BALL SPIN FREQUENCY	46.692	Hz	
D.2.4. FUNDAMENTAL TRAIN FREQUENCY	4.2006	Hz	

Buttons: BACK, APPLY, EXIT

Figura 4.88. Datos de defectos en elemento rodante.

Si se pulsa el botón “APPLY” se abre una ventana (Figura 4.89.).

INFORMACIÓN SOBRE ELEMENTO RODANTE

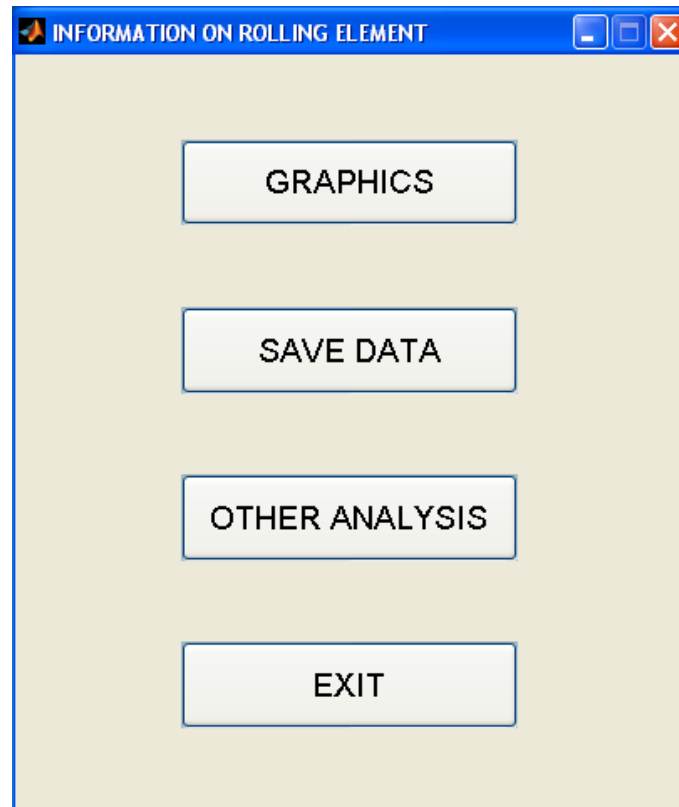


Figura 4.89. Opciones para la simulación.

Si se pulsa el botón “GRAPHICS” aparecen las ventanas de la Figura 4.90. y de la Figura 4.91., pero no se cierra esta ventana por si se desea realizar las otras opciones, esto mismo se hace con “SAVE DATA” y “OTHER ANALYSIS”. Si desea guardar datos pulsará el botón “SAVE DATA” y aparecerá la ventana de la Figura 4.83. Si además quiere pulsar el botón “OTHER ANALYSIS” se va a la Figura 4.57.y continúa como se ha explicado anteriormente. Botón “EXIT” cierra esta ventana.

GRÁFICAS DEL ELEMENTO RODANTE

Las figuras generadas contienen las mismas gráficas que en los apartados anteriores, pero en este caso para el defecto en elemento rodante. Figuras 4.90. y 4.91.

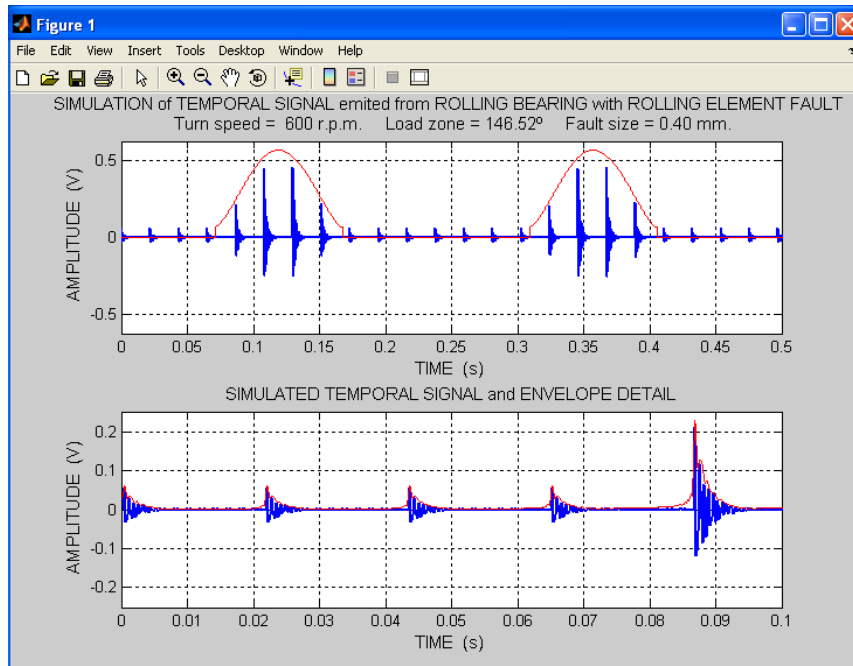


Figura 4.90. Gráfica de la señal temporal, envolvente de la zona y detalle de la envolvente.

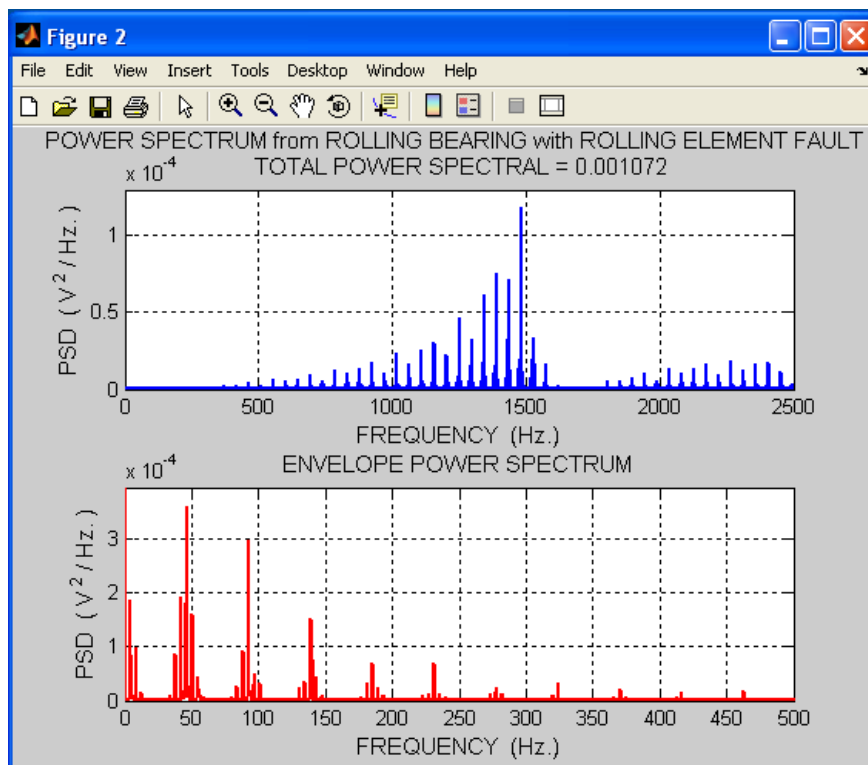


Figura 4.91. Espectro de potencia y espectro de potencia de la envolvente de la señal.

Capítulo V:

RESULTADOS



V. RESULTADOS

Este capítulo pretende complementar el capítulo de descripción funcional de la aplicación mediante casos prácticos. Se realiza para verificar que la aplicación ADEVI3.1. aporta resultados válidos para el análisis de vibraciones.

Se divide en tres partes. Primero se estudia el análisis de un fichero de datos de vibraciones, después se estudiarán las gráficas Wavelet aparte, debido a su complejidad, y, finalmente, se presentan simulaciones de vibraciones causadas por defectos en diferentes partes de los rodamientos. Se irá explicando pantalla por pantalla todos los resultados obtenidos del análisis.

1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEDIANTE UN FICHERO DE DATOS

Para este caso del análisis de vibraciones se va a utilizar un juego de ficheros obtenido de ensayos de cojinetes de bolas, del mismo tipo, con distintos niveles de defecto y montados en el eje de una máquina rotativa de ensayos. Se utilizan veinticinco rodamientos, cinco por defecto. La nomenclatura utilizada en los ficheros es un código IAV120SB en que cada dígito significa: “I”, para anillo interior; “A”: un código numérico de una cifra que corresponde al defecto (0, 1, 2, 5 y X, éste último en número romano, mm); “V”, velocidad de giro en rpm, seguido de un código numérico de tres cifras que indica a la velocidad de giro en rpm que se ha tomado los datos, en este caso 1.200 rpm que son 20 Hz; “SB”: un código alfanumérico de dos caracteres que corresponde a la numeración de cada grupo de cinco rodamientos (S1, S2, S3, S4, S5):

Tabla 5.1. Nomenclatura de los ficheros a analizar.

No tiene defecto	Defecto de 1 mm	Defecto de 2 mm	Defecto de 5 mm	Defecto de 10 mm
I0V120S1	I1V120S1	I2V120S1	I5V120S1	IXV120S1
I0V120S2	I1V120S2	I2V120S2	I5V120S2	IXV120S2
I0V120S3	I1V120S3	I2V120S3	I5V120S3	IXV120S3
I0V120S4	I1V120S4	I2V120S4	I5V120S4	IXV120S4
I0V120S5	I1V120S5	I2V120S5	I5V120S5	IXV120S5

Estos ficheros constan de una columna de datos cada uno, que es la columna que contiene la señal vibratoria.

Se va a analizar uno de los ficheros para mostrar los resultados obtenidos al analizarlos mediante la aplicación ADEVI 3.1.

En los siguientes apartados se muestra y comprueba la eficacia de la aplicación ADEVI3.1. a la hora de realizar las gráficas del análisis de vibraciones en el entorno frecuencial y temporal, es decir gráficas PSD, espectro de envolvente, espectrograma, señal temporal, envolvente y transformada Wavelet.

Además, se exponen los resultados que la aplicación ofrece para el análisis estadístico de la señal estudiada.

Para mostrar los resultados gráficos de la primera parte de la aplicación, se procede a estudiar la señal I2V120S3 correspondiente al tercer cojinete del grupo con tamaño de defecto de 2 mm. Para obtener los resultados utilizando la aplicación ADEVI3.1. hay que disponer de una serie de datos de partida, estos son:

- La ubicación del fichero de datos que contiene la señal a analizar.
El fichero de datos en el momento del análisis se encuentra en la ruta C:\ADEVI3.1\Datos\ INT_02\I2V120S3.DAT.
- La frecuencia del ensayo, en Hz. Su valor es 5.000 Hz.

Al ejecutar la aplicación desde MATLAB se pasa por una serie de pantallas en las que se introducen los datos de cada supuesto y se obtienen los resultados para el análisis.

Para las gráficas de resultado de análisis vibratorio se representa, en primer lugar, la pantalla de resultados de la aplicación que contiene la gráfica representada en todo su dominio (de tiempo o de frecuencia, según el caso) y una leyenda de identificación del gráfico y, seguidamente, se muestra un detalle de la señal representada.

El detalle generado se realiza mediante la opción de edición de gráficos que contiene la aplicación, que genera una ventana secundaria que contiene el gráfico de la señal escogido en cada caso. Esta ventana contiene títulos de ejes así como de gráfico y dispone de un mallado en la pantalla gráfica con opciones de edición que permiten obtener una gran diversidad de imágenes. Entre estas opciones destacan el zoom, la variación de colores y espesores de línea de gráfico y la posibilidad de grabar e imprimir la figura generada.

GRÁFICAS DEL ANÁLISIS VIBRATORIO

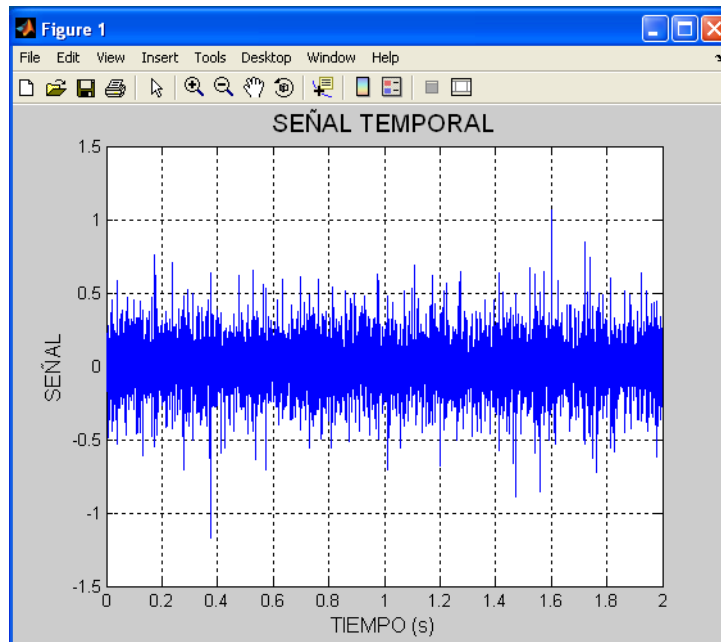


Figura 5.1.a. Pantalla de resultados de ADEVI representando la señal temporal de I2V120S3.

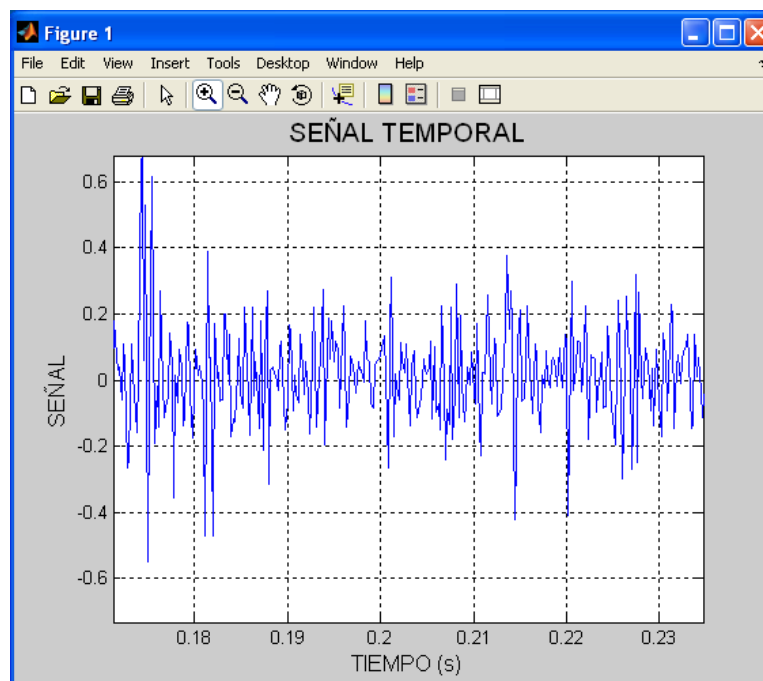


Figura 5.1.b. Detalle de uno de los impulsos de la señal temporal de I2V120S3 realizados con zoom.

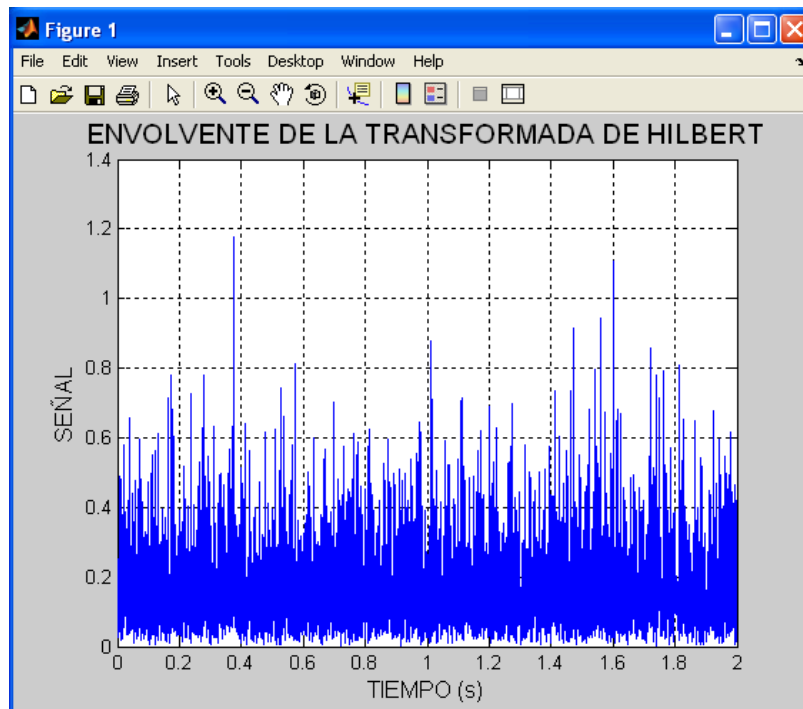


Figura 5.2.a. Pantalla de resultados de ADEVI representando la envolvente de I2V120S3.

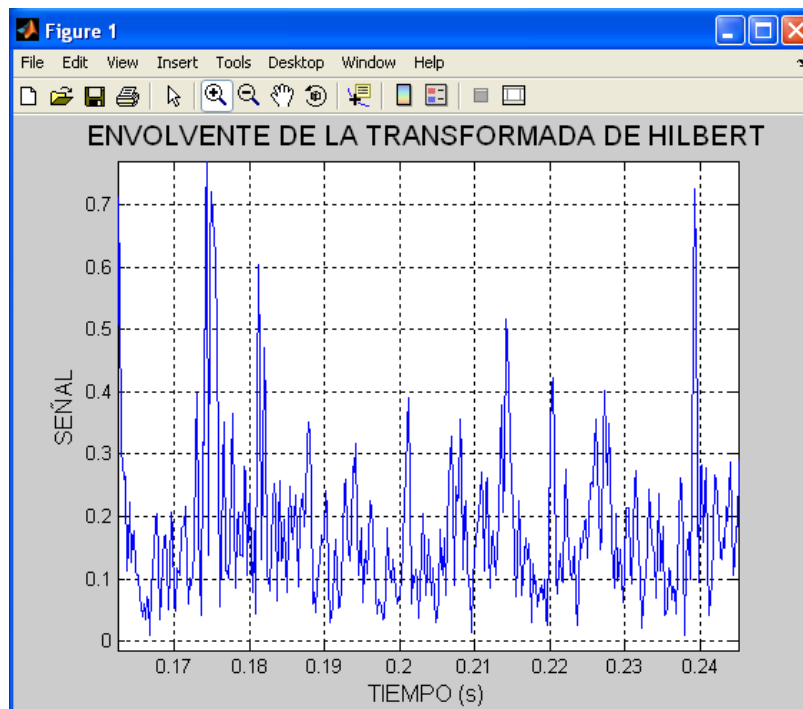


Figura 5.2.b. Detalle de la envolvente de I2V120S3, realizado mediante zoom.

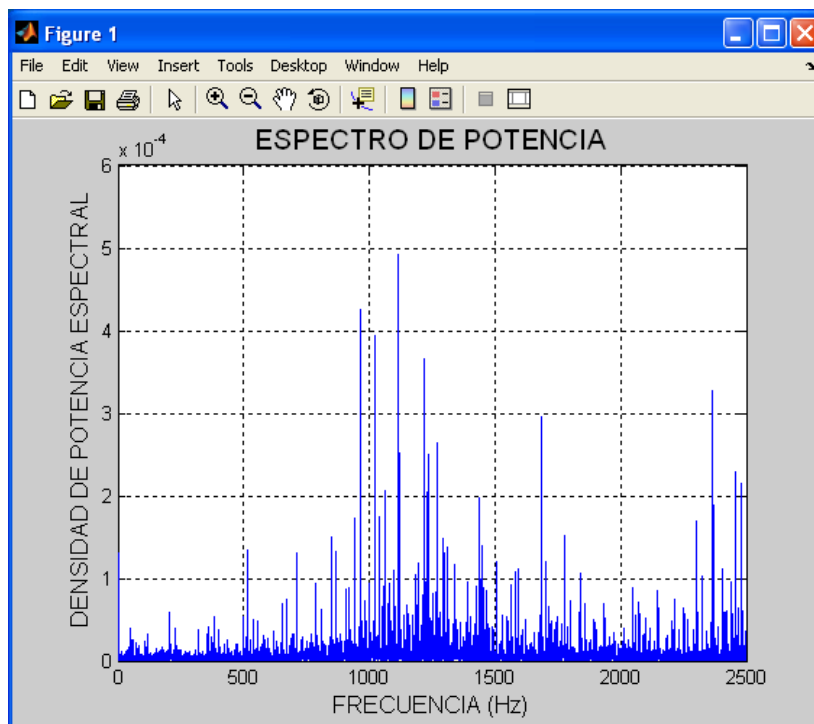


Figura 5.3.a. Pantalla de resultados de ADEVI representando la PSD de I2V120S3.

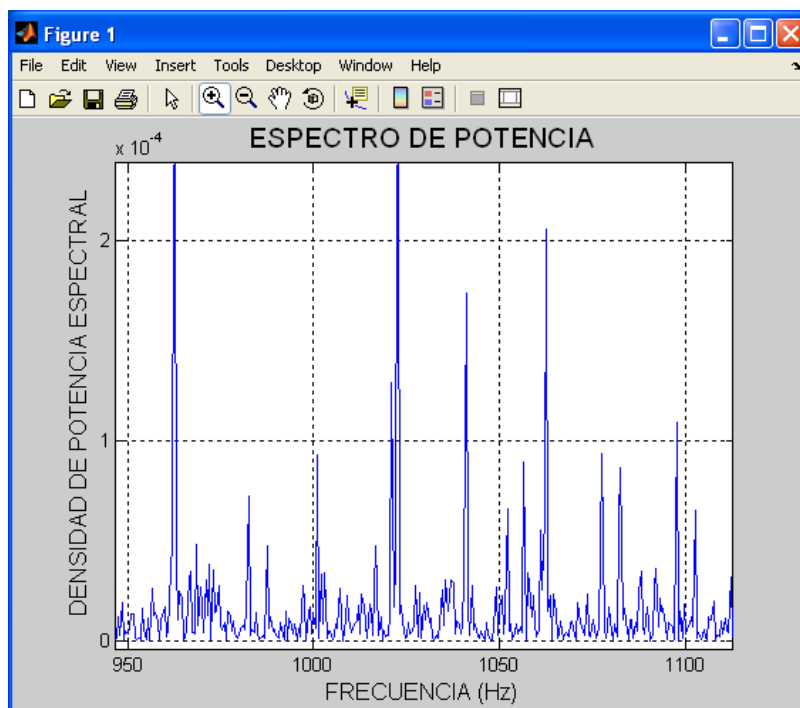


Figura 5.3.b. Detalle de la PSD de I2V120S3, realizado mediante zoom.

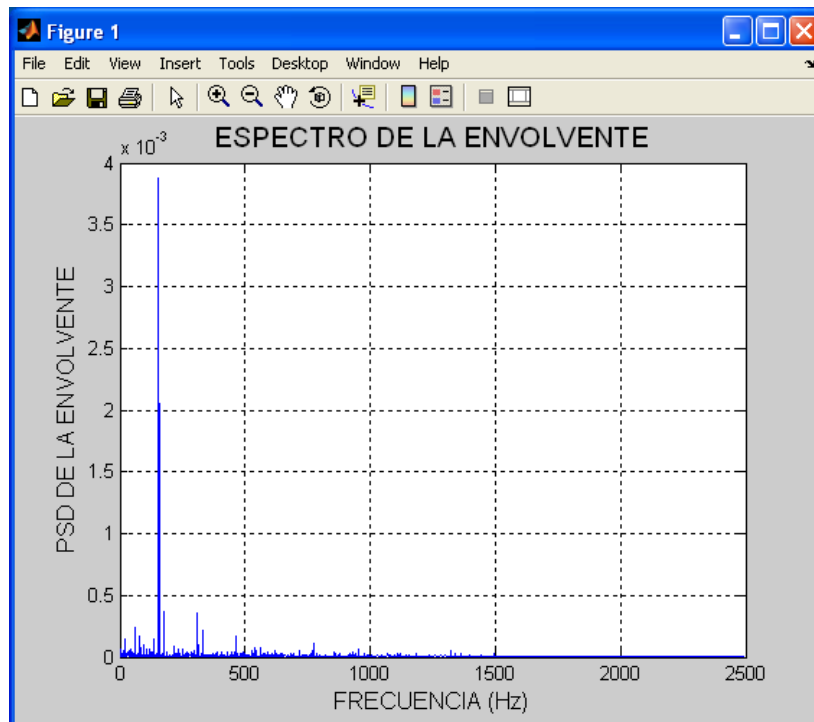


Figura 5.4.a. Pantalla de resultados de ADEVI con el espectro de envolvente de I2V120S3.

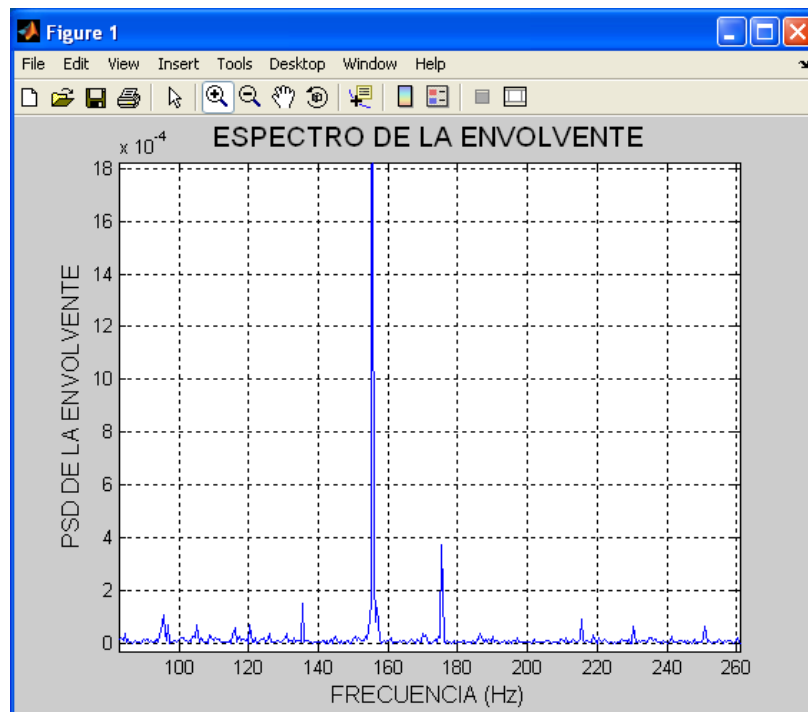


Figura 5.4.b. Detalle del espectro de la envolvente de I2V120S3, realizado mediante zoom.

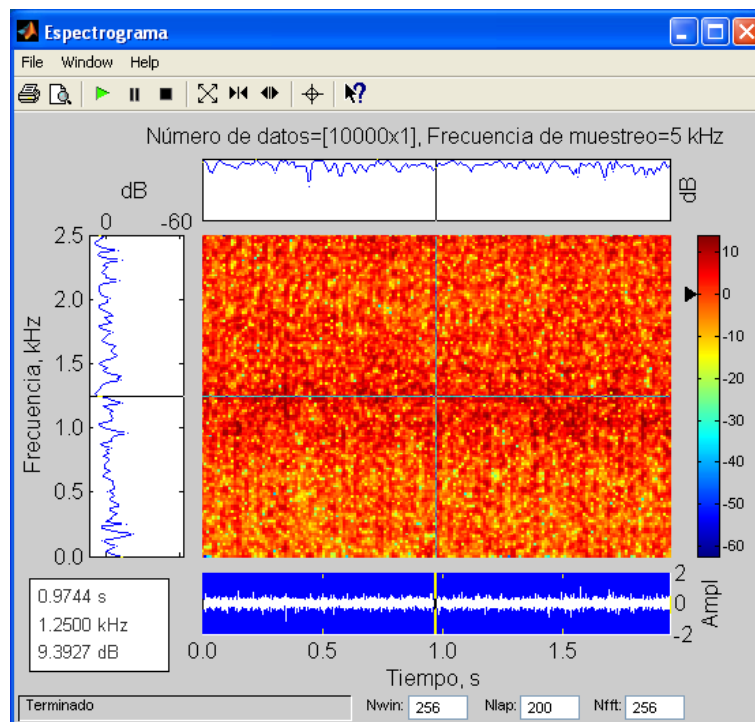


Figura 5.5.a. Pantalla de resultados de ADEVI con el espectrograma de I2V120S3.

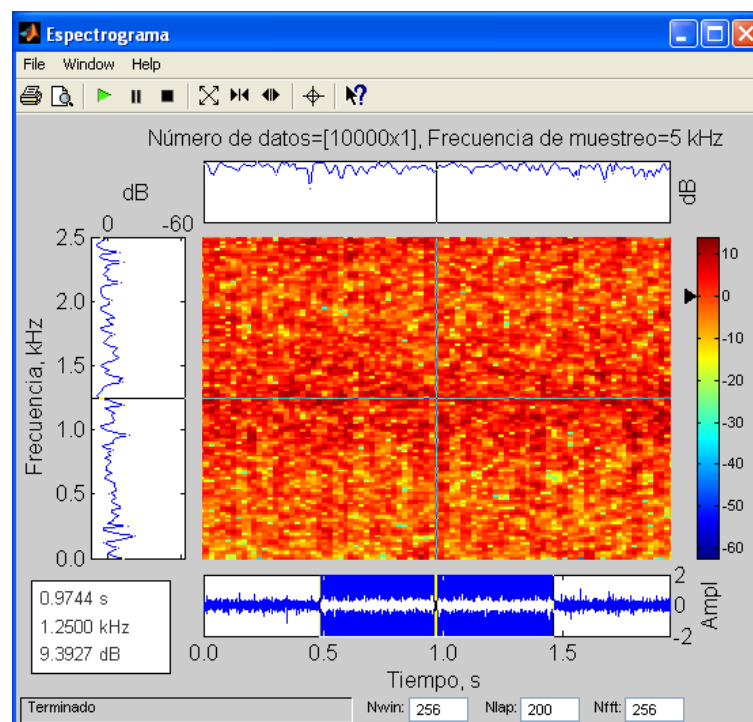


Figura 5.5.b. Detalle del espectrograma de I2V120S3, realizado mediante zoom.

RESULTADOS ESTADÍSTICOS



Figura 5.6. Datos estadísticos obtenidos del fichero I2V120S3.

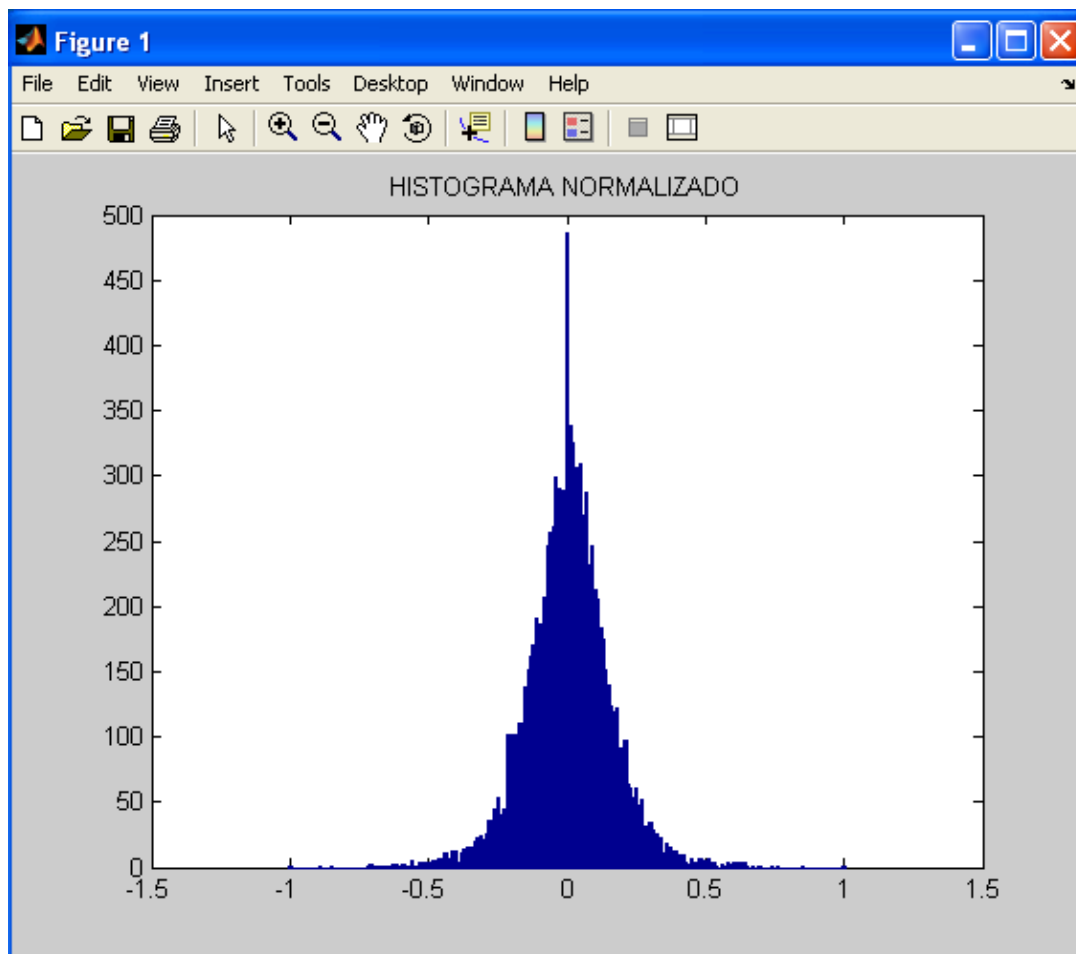


Figura 5.7. Histograma normalizado del fichero I2V120S3.

En la Figura 5.6. se muestra la ventana de resultados que la aplicación genera para el fichero de datos que se está analizando. En ella se observan los datos característicos de la muestra en cuanto a análisis estadístico se refiere, estos datos se clasifican en diferentes grupos, medidas de centralización (media y mediana), medidas de dispersión (varianza), medidas de forma (kurtosis y sesgo) y otras medidas que suelen incluirse en el análisis de la señal mediante el dominio temporal y frecuencial (valor de pico, factor de forma, valor medio,...).

Complementando los datos descritos anteriormente, la aplicación genera un gráfico llamado histograma normalizado. La Figura 5.7. representa una distribución normal de los datos en tanto por uno, la media tomada para ésta representación es de valor cero y su intervalo es $[-1,1]$. Se realiza de esta manera para obtener un gráfico similar para todas las muestras. Este gráfico representado posee todas las herramientas de edición necesarias para facilitar la labor de análisis de la señal en el ámbito estadístico.

2. TRANSFORMADA WAVELET

En este apartado se describirían los resultados de dibujar la transformada Wavelet de la señal. Para no saturar el apartado con gráficas, en esta memoria se reflejarán cada índices de cada una de las Wavelet madre en la escala de 128. Se utilizará para la prueba el fichero usado anteriormente, es decir, el I2V120S3.

En la representación gráfica de la transformada Wavelet, la parte superior se refiere a baja frecuencia, si es borrosa significa que no puede dar información sobre baja frecuencia; si, en cambio, se puede contar el número de franjas que tiene y sabiendo el número de vueltas, se obtiene la velocidad de giro en Hz. Por ejemplo, son 60 franjas y el número de vueltas es 3, si se divide el número de franjas entre número de vueltas se obtiene que es 20 Hz la velocidad de giro. La parte inferior se refiere a modos de alta frecuencia, muestra los impactos que excitan los modos de alta frecuencia, cuanto más claro esté, a veces llega a ser blanco, hay más energía.

Para todos los casos se supondrá una velocidad de 20 Hz y un número de vueltas igual a tres.

2.1. Daubechies

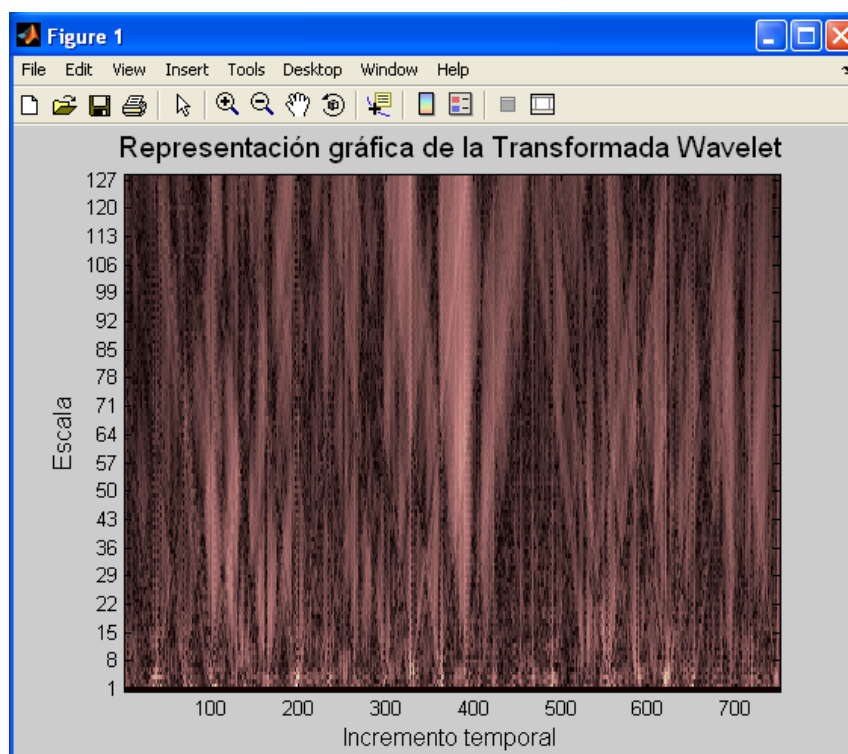


Figura 5.8. Daubechies Haar.

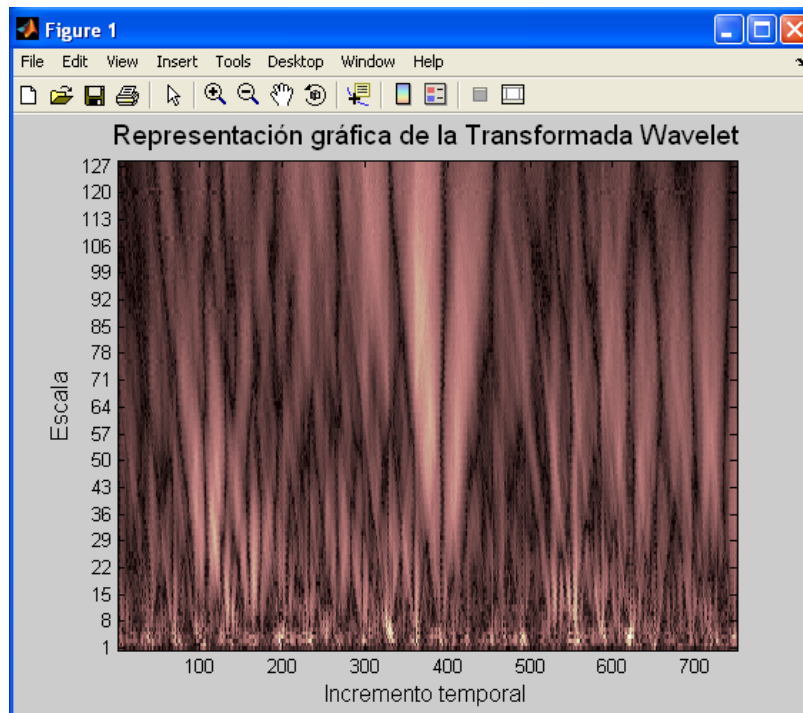


Figura 5.9. Daubechies 2.

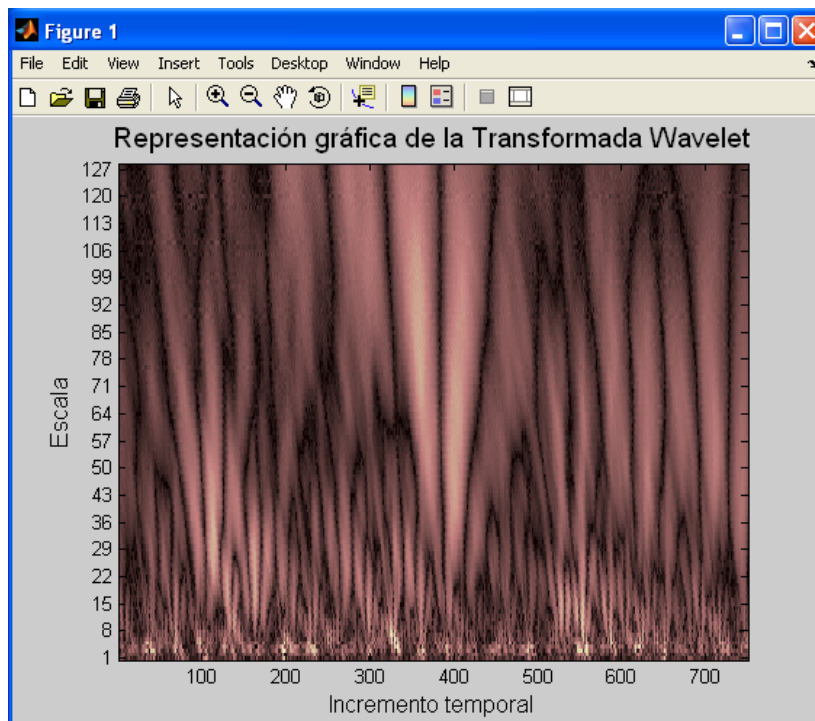


Figura 5.10. Daubechies 3.

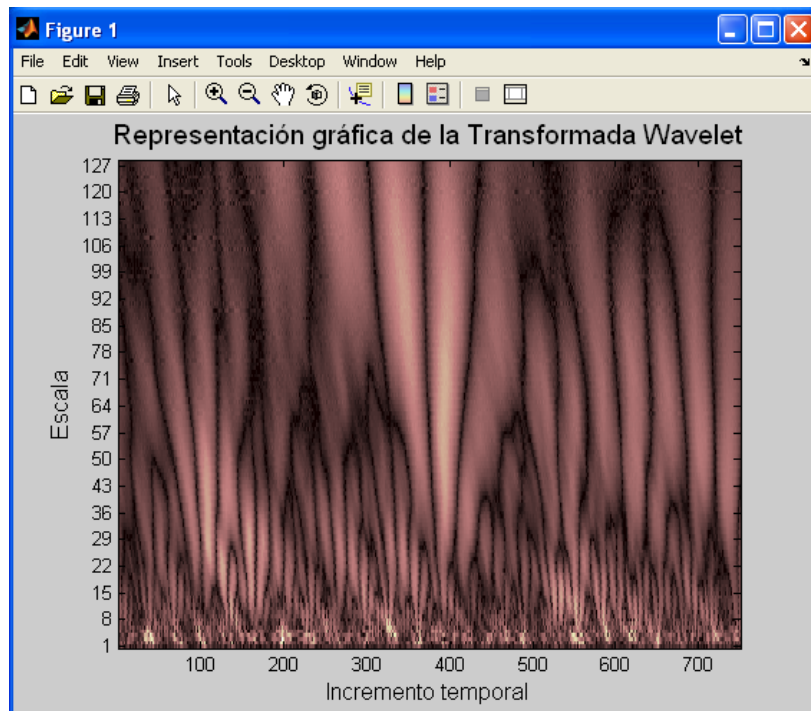


Figura 5.11. Daubechies 4.



Figura 5.12. Daubechies 5.

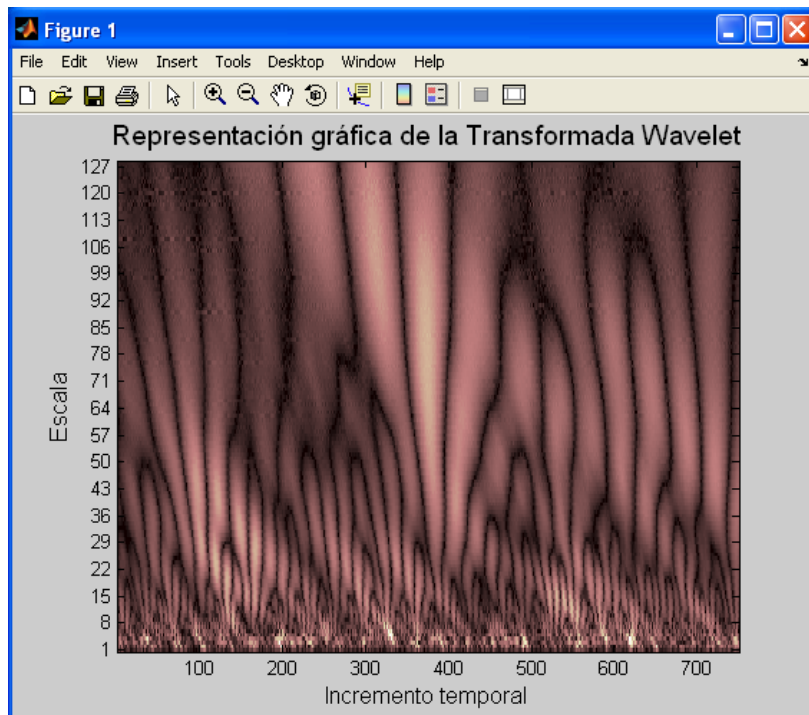


Figura 5.13. Daubechies 6.

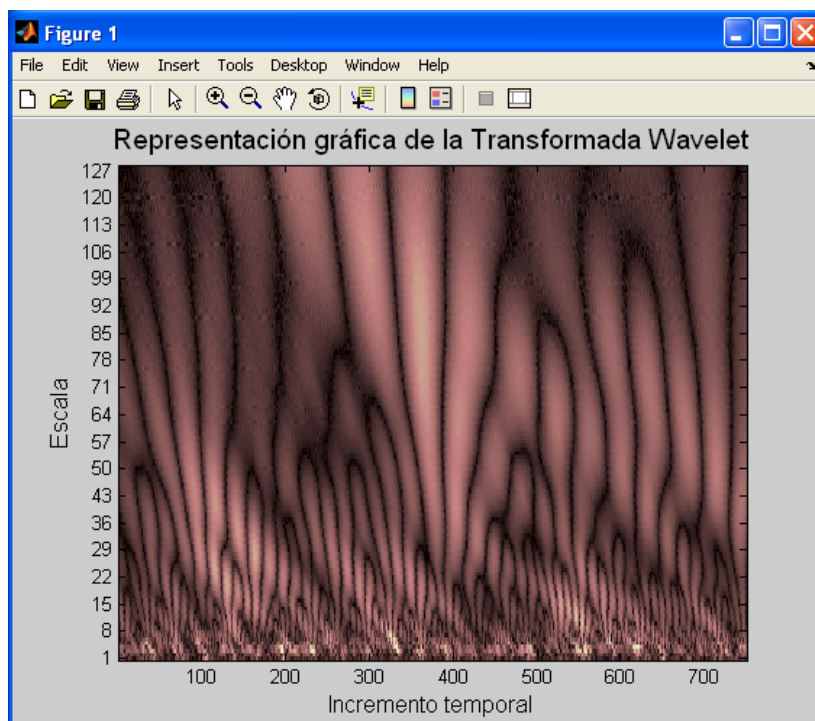


Figura 5.14. Daubechies 7.

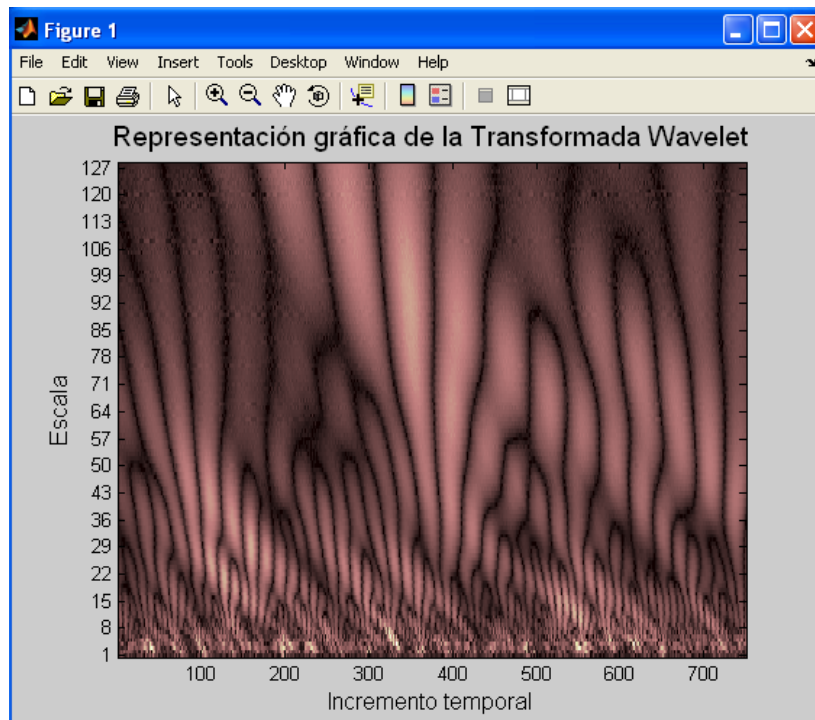


Figura 5.15. Daubechies 8.

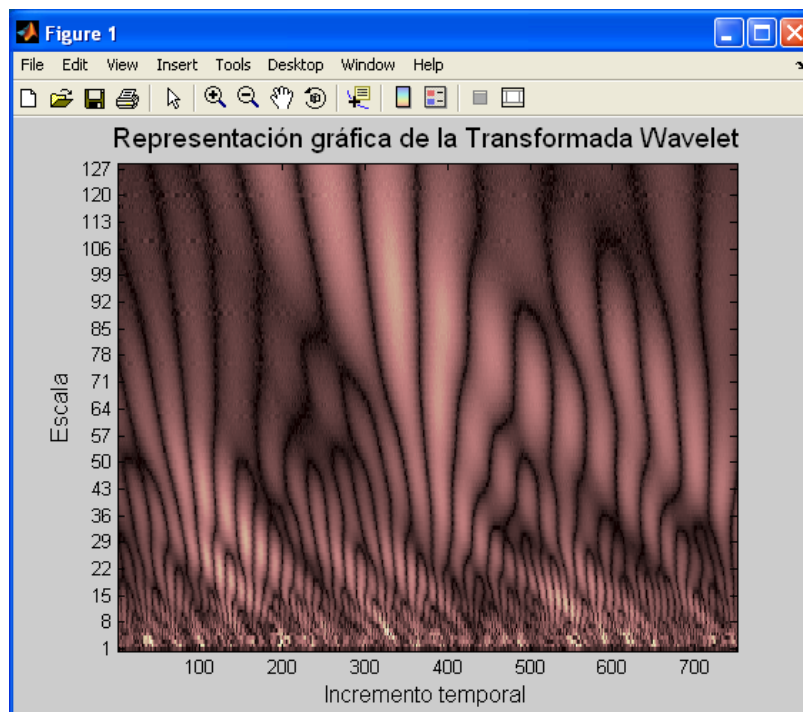


Figura 5.16. Daubechies 9.



Figura 5.17. Daubechies 10.

2.2. Morlet

Al ser una familia de orden único, este apartado tendrá tan solo una gráfica.

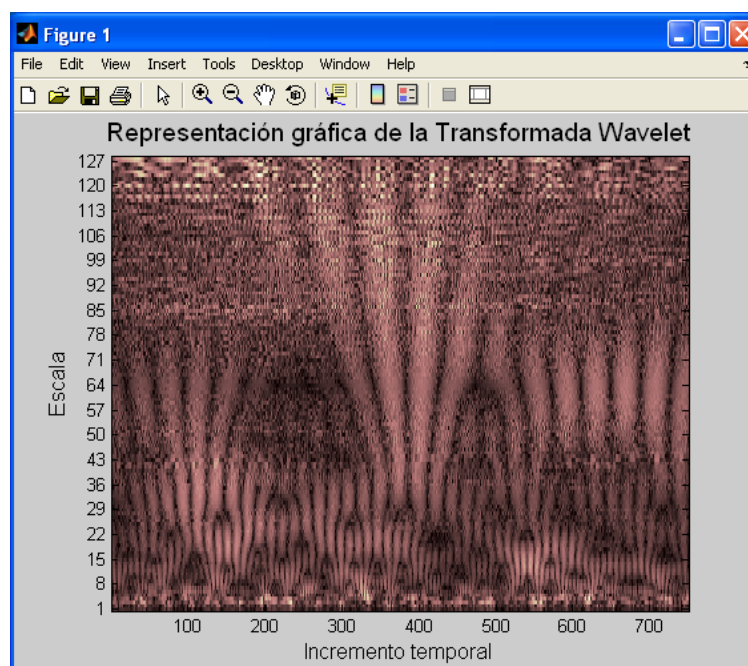


Figura 5.18. Morlet.

2.3. Mexican Hat

Al ser una familia de orden único, este apartado tendrá sólo una gráfica.

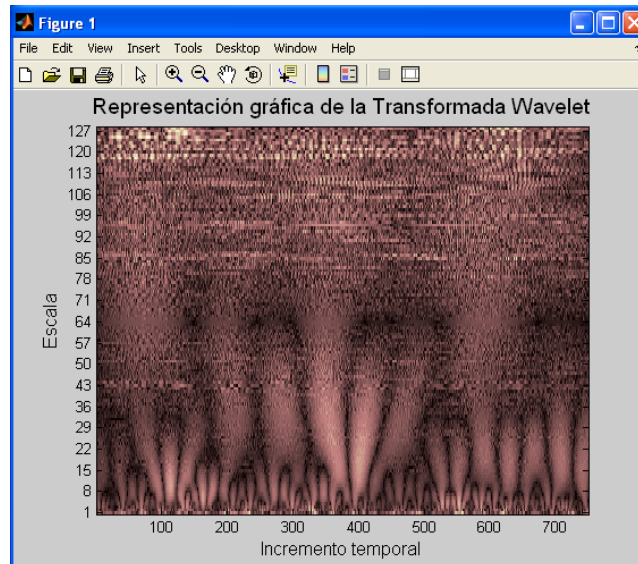


Figura 5.19. Mexican Hat.

2.4. Meyer

Al ser una familia de orden único, este apartado tendrá sólo una gráfica.

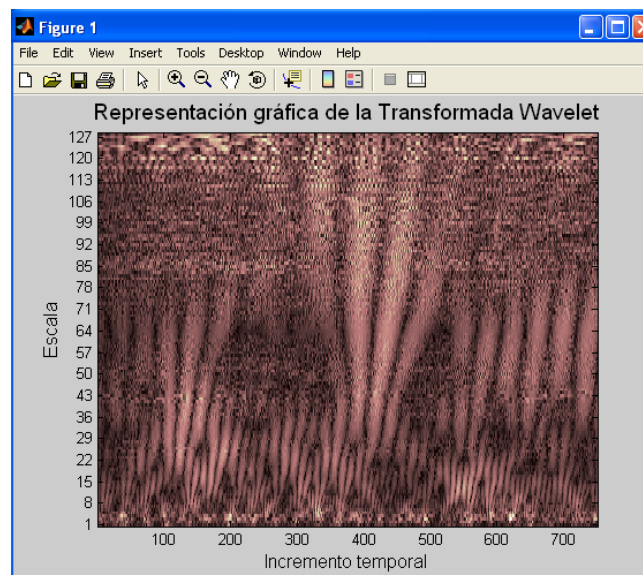


Figura 5.20. Meyer.

2.5. Symlet

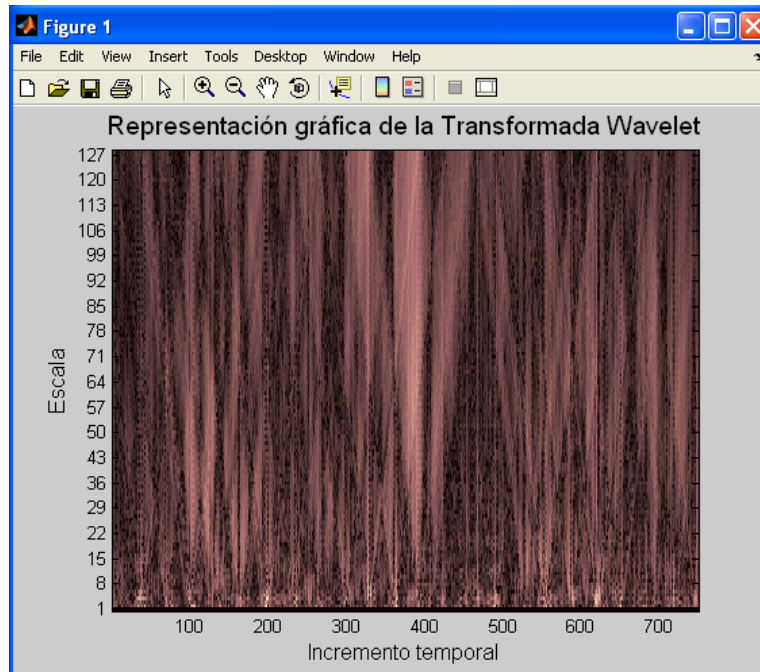


Figura 5.21. Symlet 1.

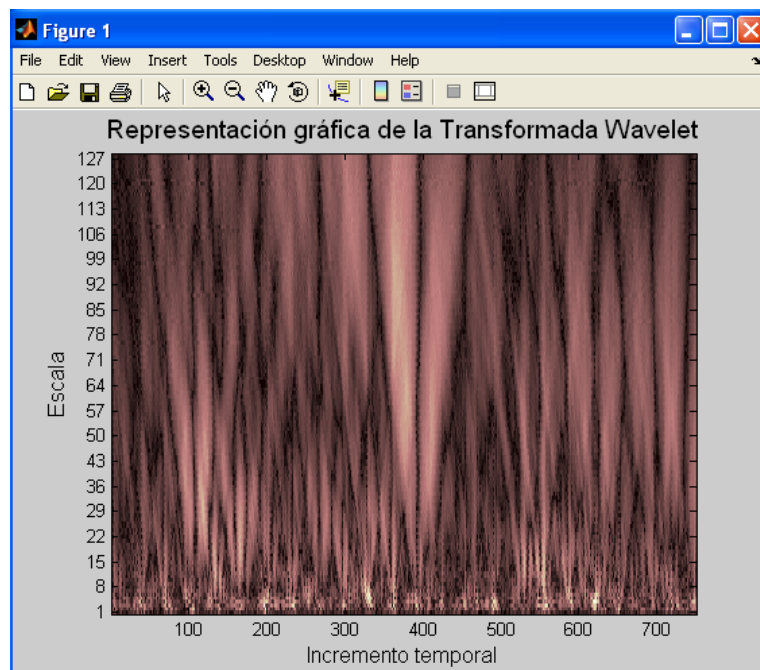


Figura 5.22. Symlet 2.

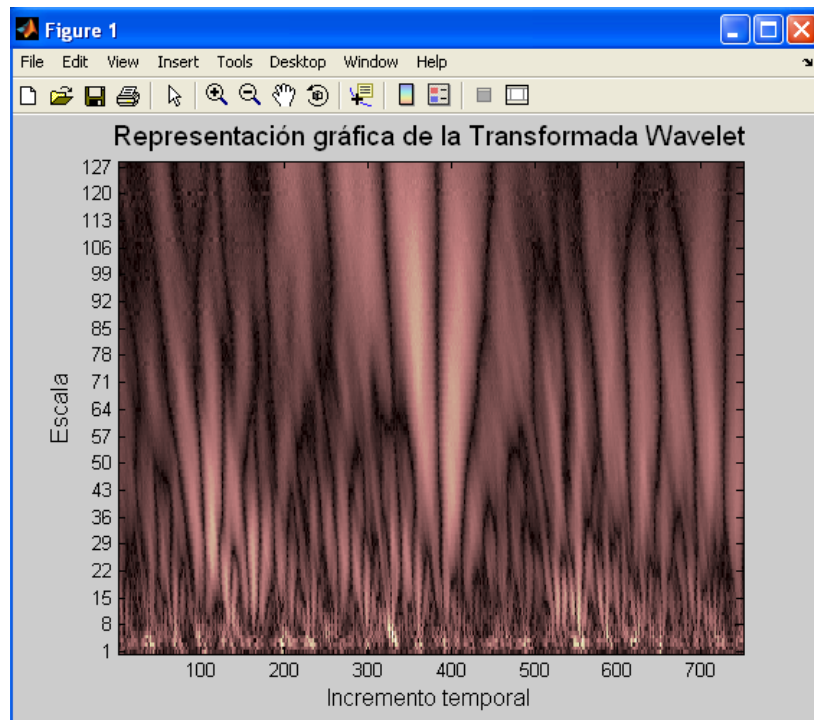


Figura 5.23. Symlet 3.

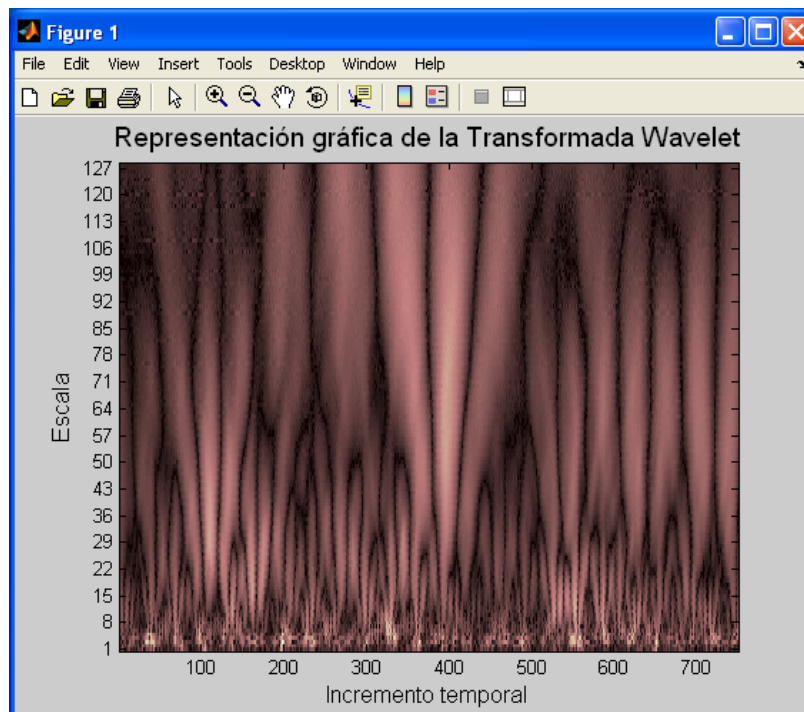


Figura 5.24. Symlet 4.



Figura 5.25. Symlet 5.

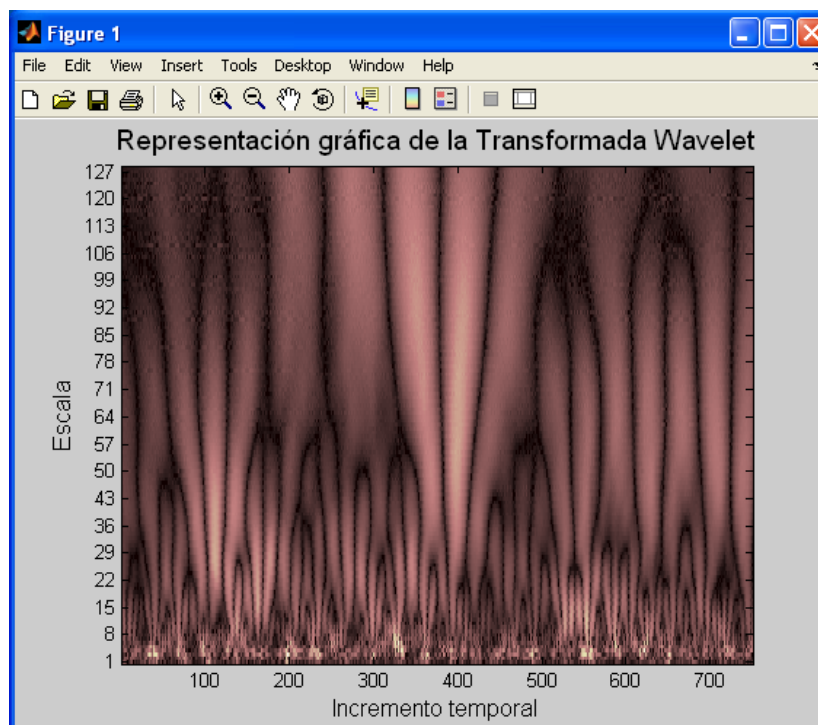


Figura 5.26. Symlet 6.

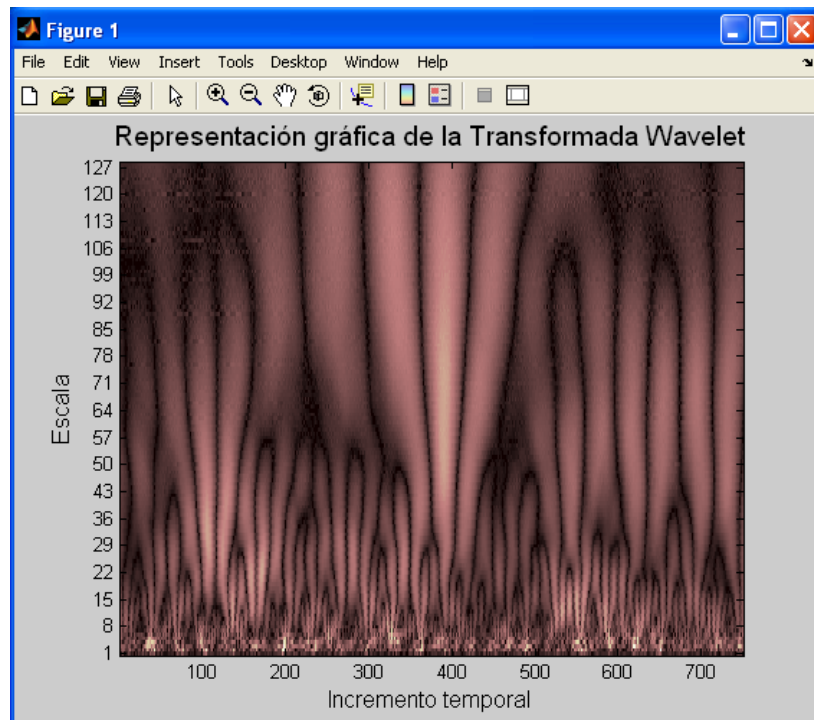


Figura 5.27. Symlet 7.

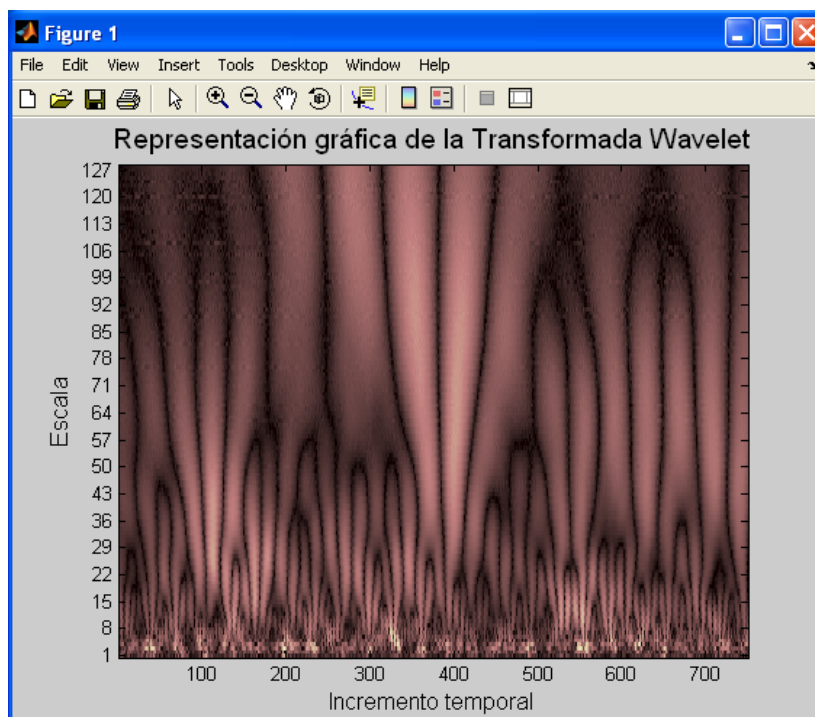


Figura 5.28. Symlet 8.

2.6. Coiflet

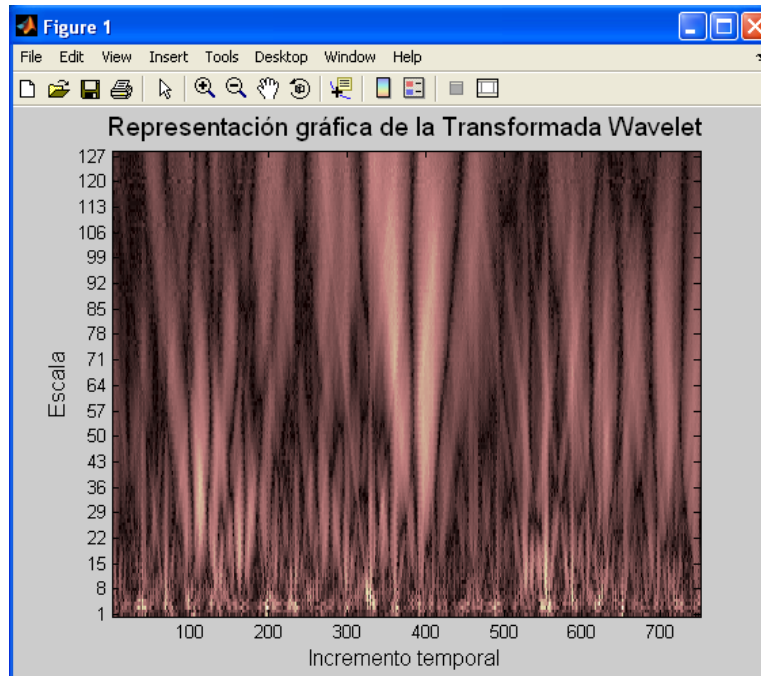


Figura 5.29. Coiflet 1.

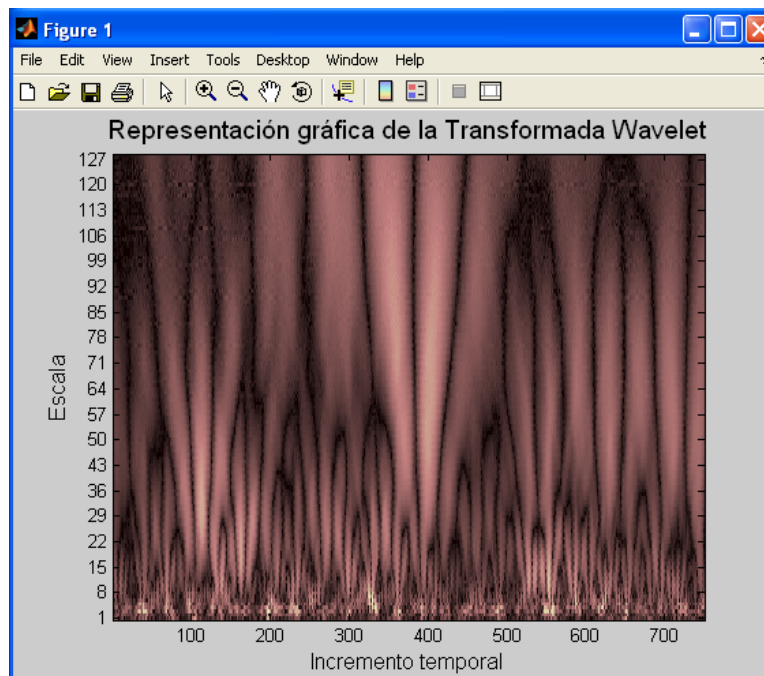


Figura 5.30. Coiflet 2.

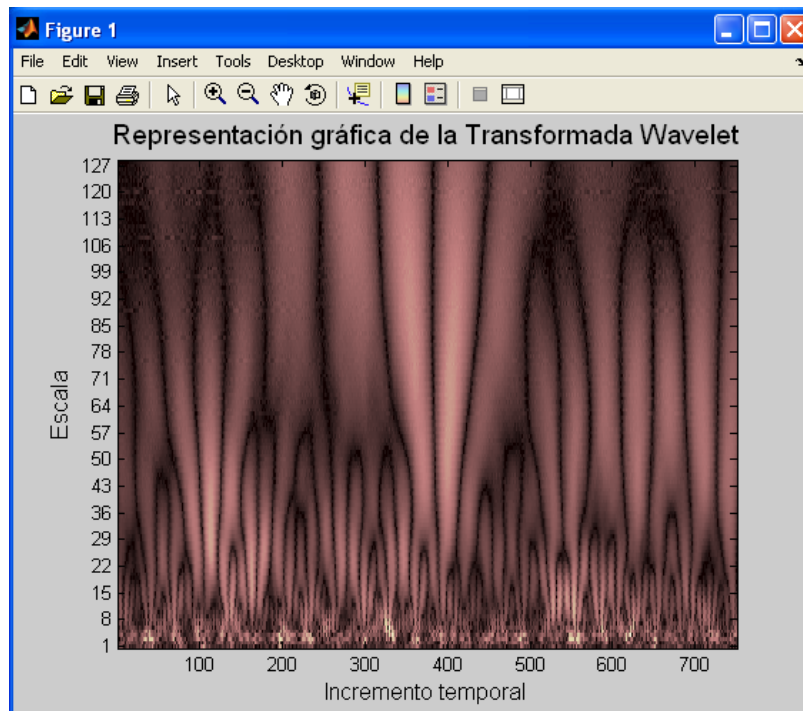


Figura 5.31. Coiflet 3.

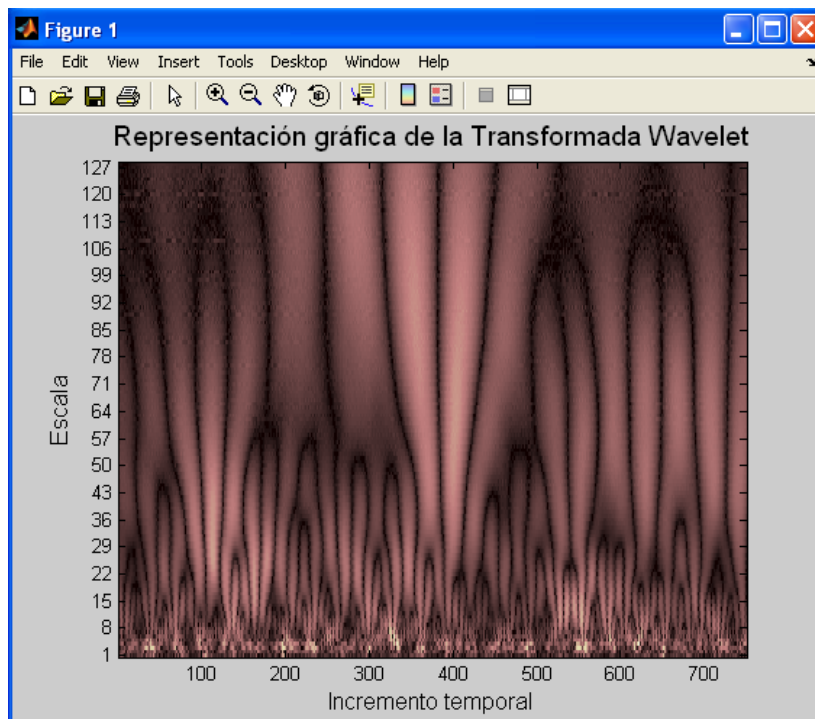


Figura 5.32. Coiflet 4.

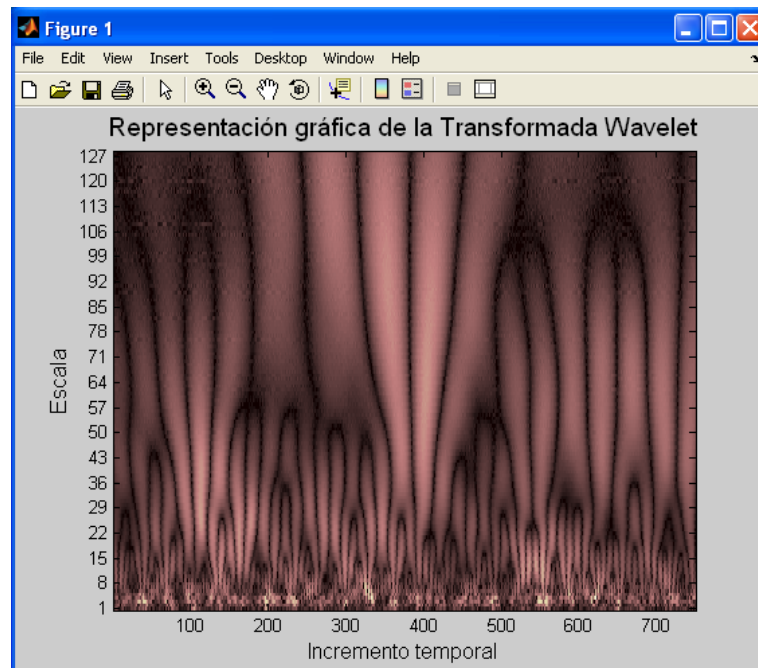


Figura 5.33. Coiflet 5.

2.7. Biortogonal

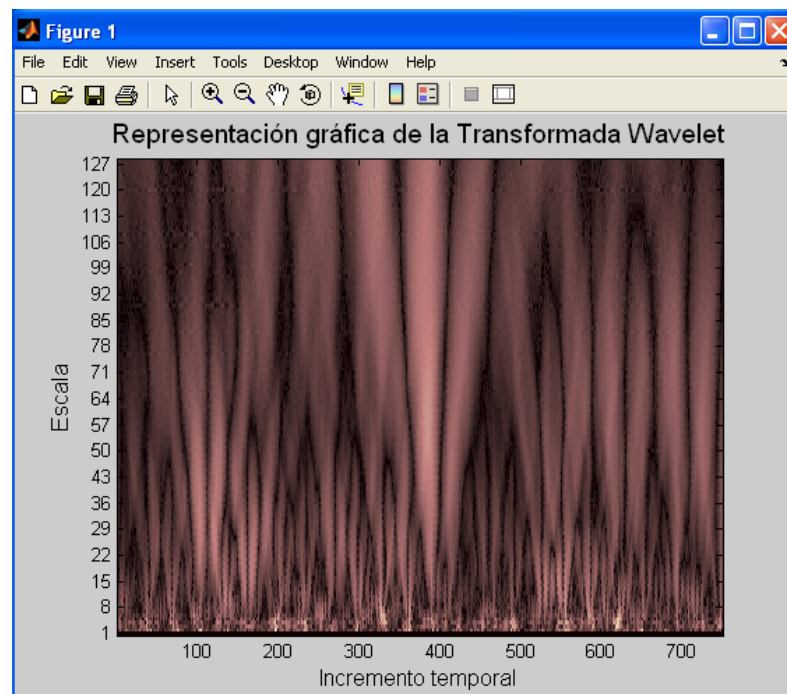


Figura 5.34. Biortogonal 1.3.



Figura 5.35. Biortogonal 1.5.

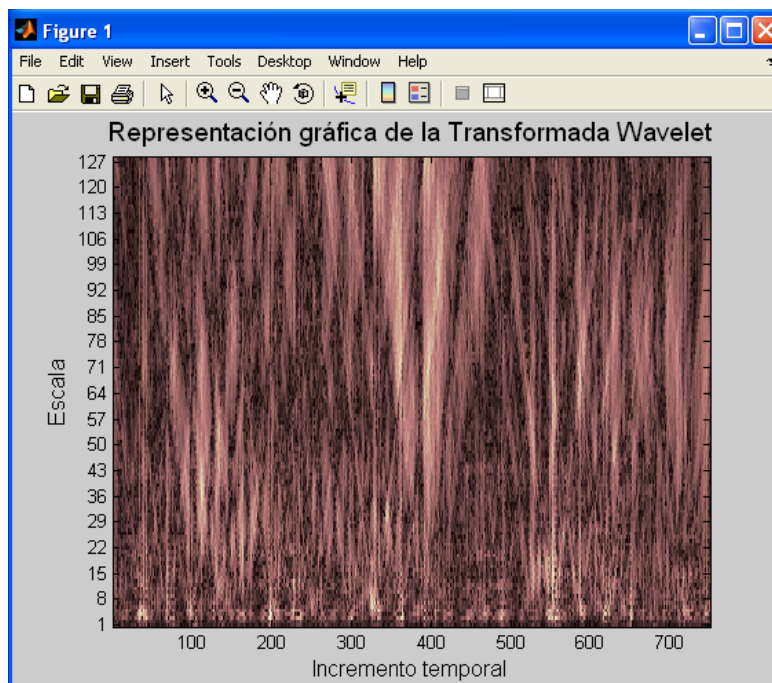


Figura 5.36. Biortogonal 2.2.



Figura 5.37. Biortogonal 2.4.

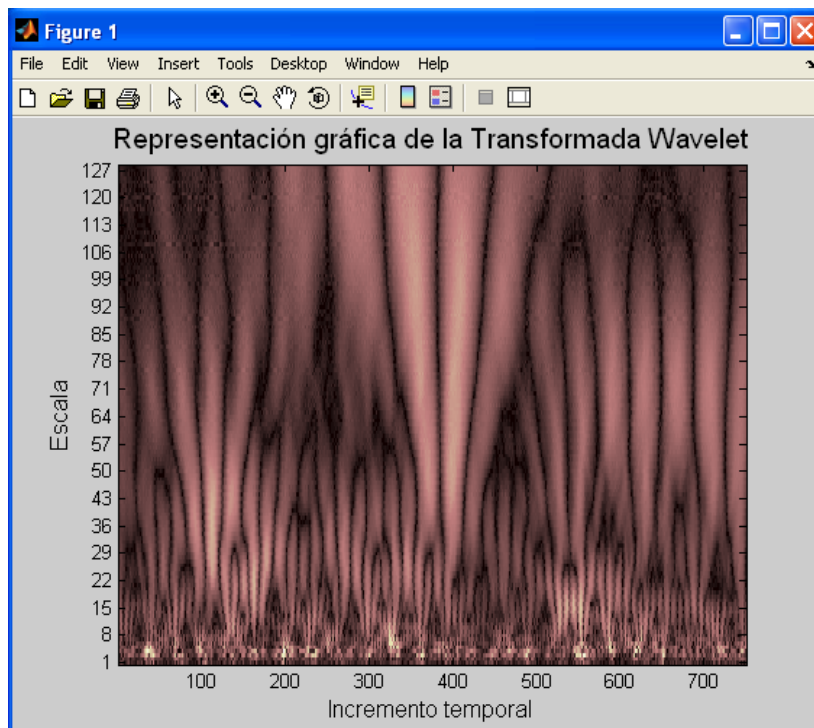


Figura 5.38. Biortogonal 2.6.



Figura 5.39. Biortogonal 2.8.

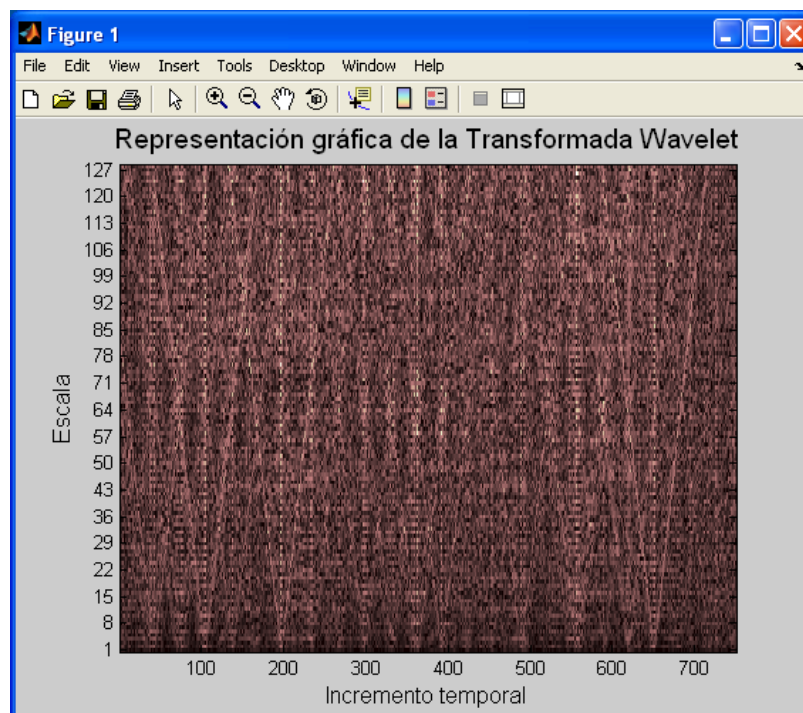


Figura 5.40. Biortogonal 3.1.

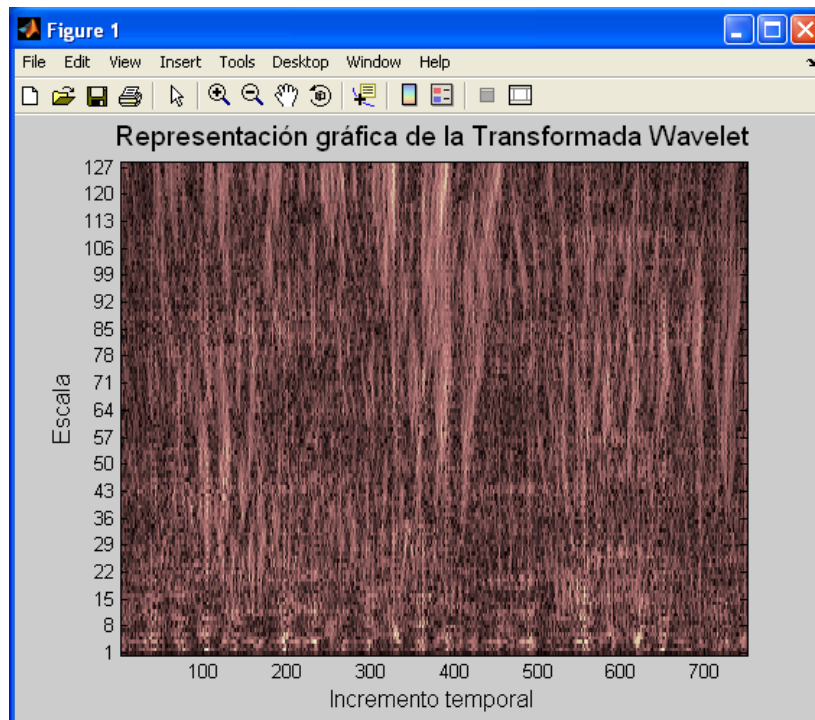


Figura 5.41. Biortogonal 3.3.

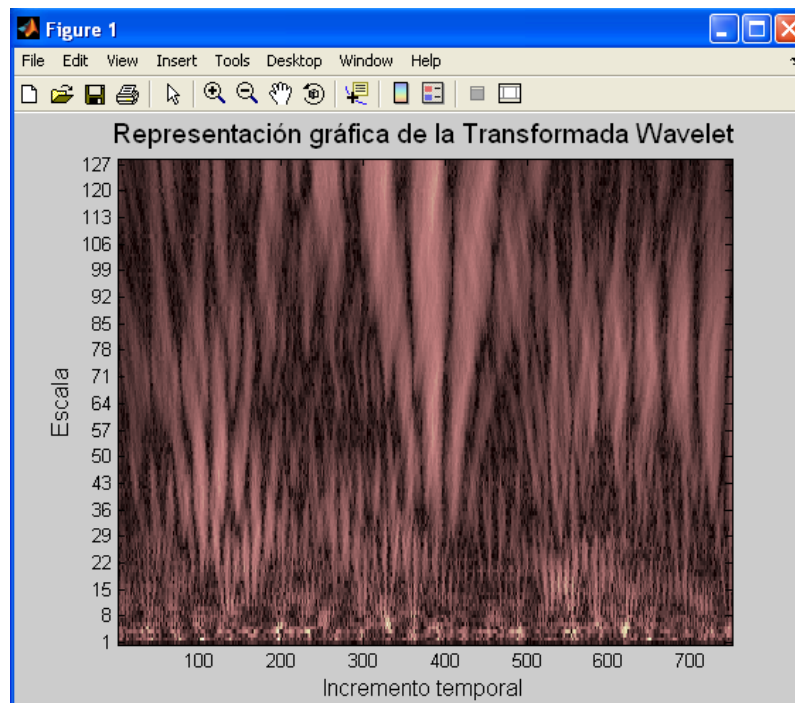


Figura 5.42. Biortogonal 3.5.

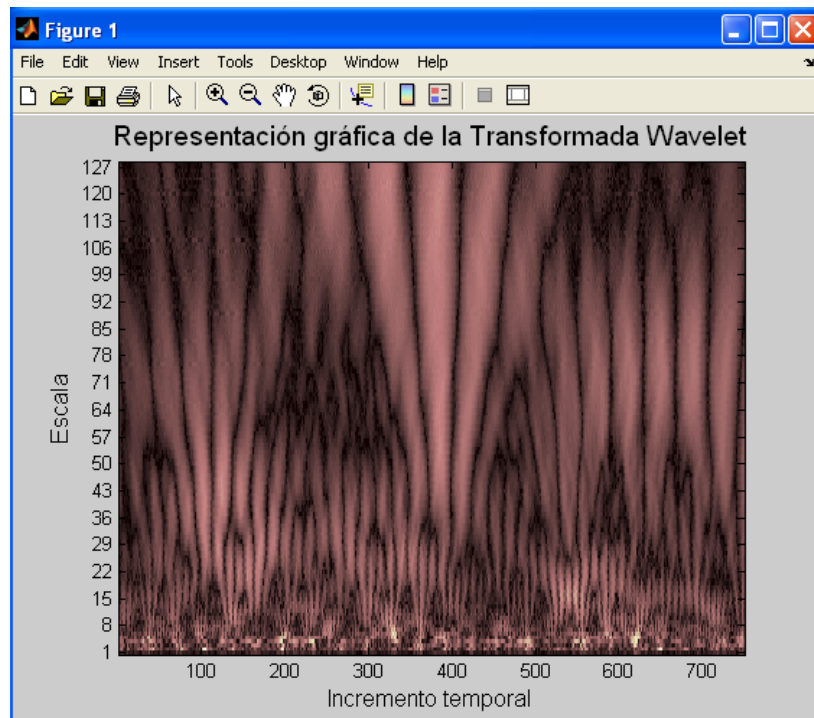


Figura 5.43. Biortogonal 3.7.

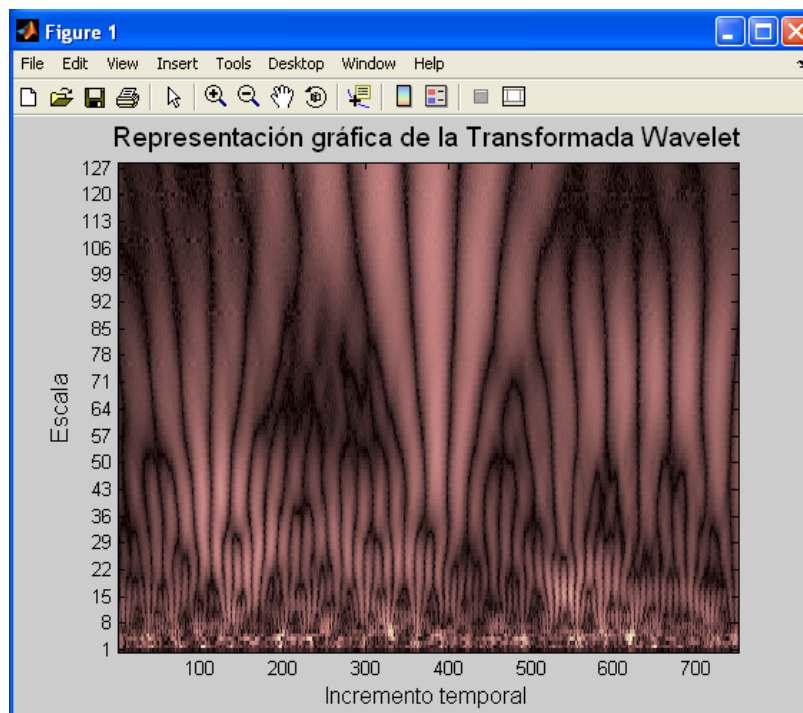


Figura 5.44. Biortogonal 3.9.



Figura 5.45. Biortogonal 4.4.

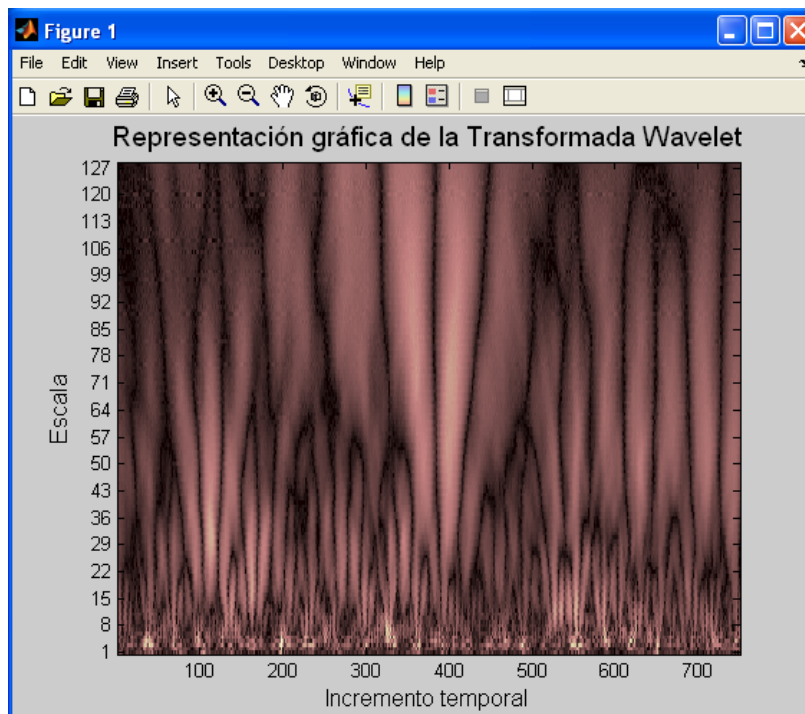


Figura 5.46. Biortogonal 5.5.

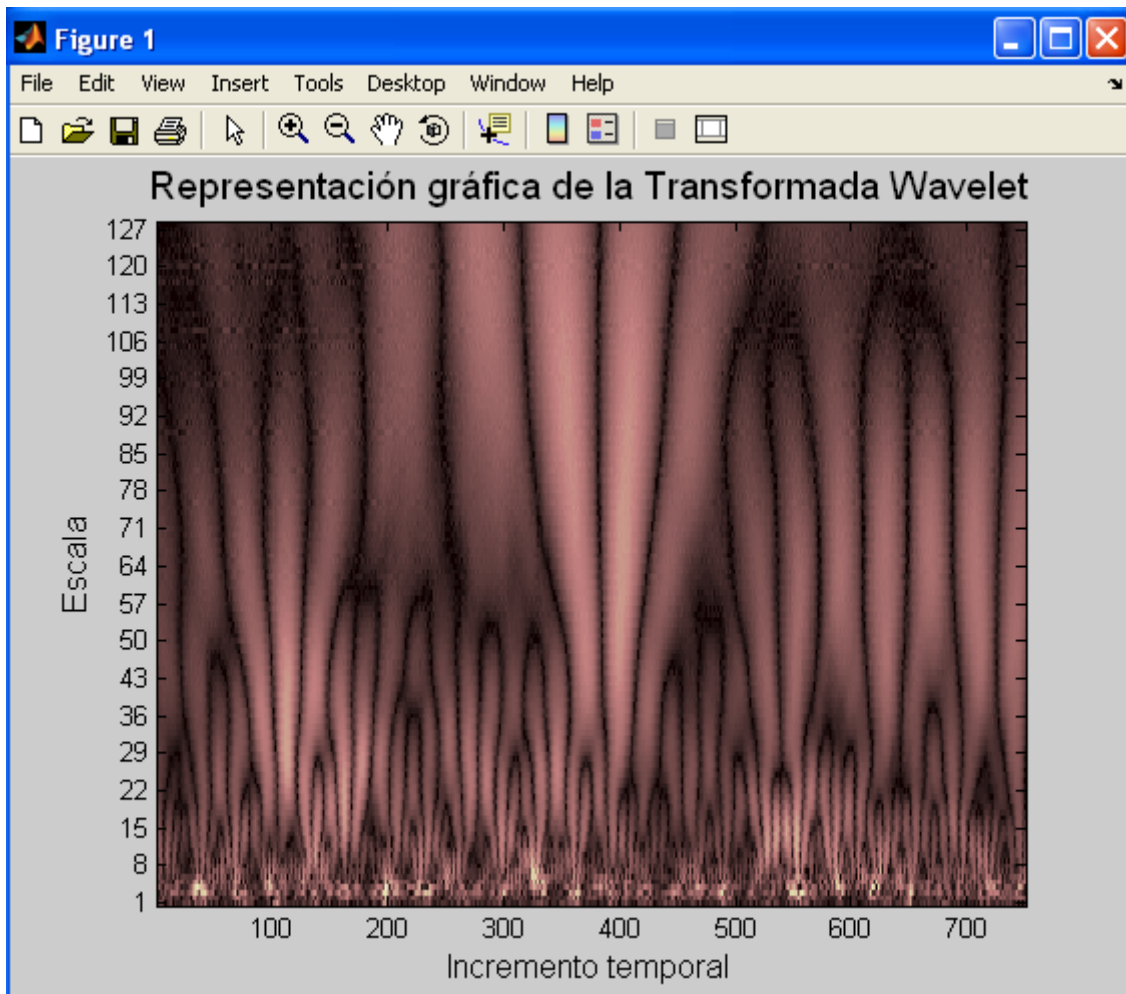


Figura 5.47. Biortogonal 6.8.



3. SIMULACIÓN DE VIBRACIONES EN RODAMIENTOS

En este apartado se describen los resultados obtenidos en la segunda parte de la que consta la aplicación ADEVI 3.1. Se realiza la simulación de vibraciones de defecto en rodamiento. Para este propósito son necesarios algunos parámetros. Se dividen en cuatro grupos:

- A. Características de la muestra, en este grupo se engloban la frecuencia de muestreo y el número de puntos.
- B. Características del sistema, entre ellas están la velocidad de giro, frecuencia de giro, coeficiente de amortiguamiento,...
- C. Características del rodamiento, número de elementos rodantes, diámetro medio,...
- D. Características del defecto, tamaño de defecto y zona de carga, entre otros.

Si se pulsa el botón “GRAFICAS” en “APLICAR_DEF_EXT.fig”, los resultados gráficos obtenidos son dos figuras que contienen dos gráficos.

En la primera figura se representan la simulación temporal emitida por un rodamiento con defecto (en cada caso será en pista exterior, interior o elemento rodante) y la zona de carga. En el segundo gráfico de la primera figura se representa un detalle de la señal temporal y su envolvente.

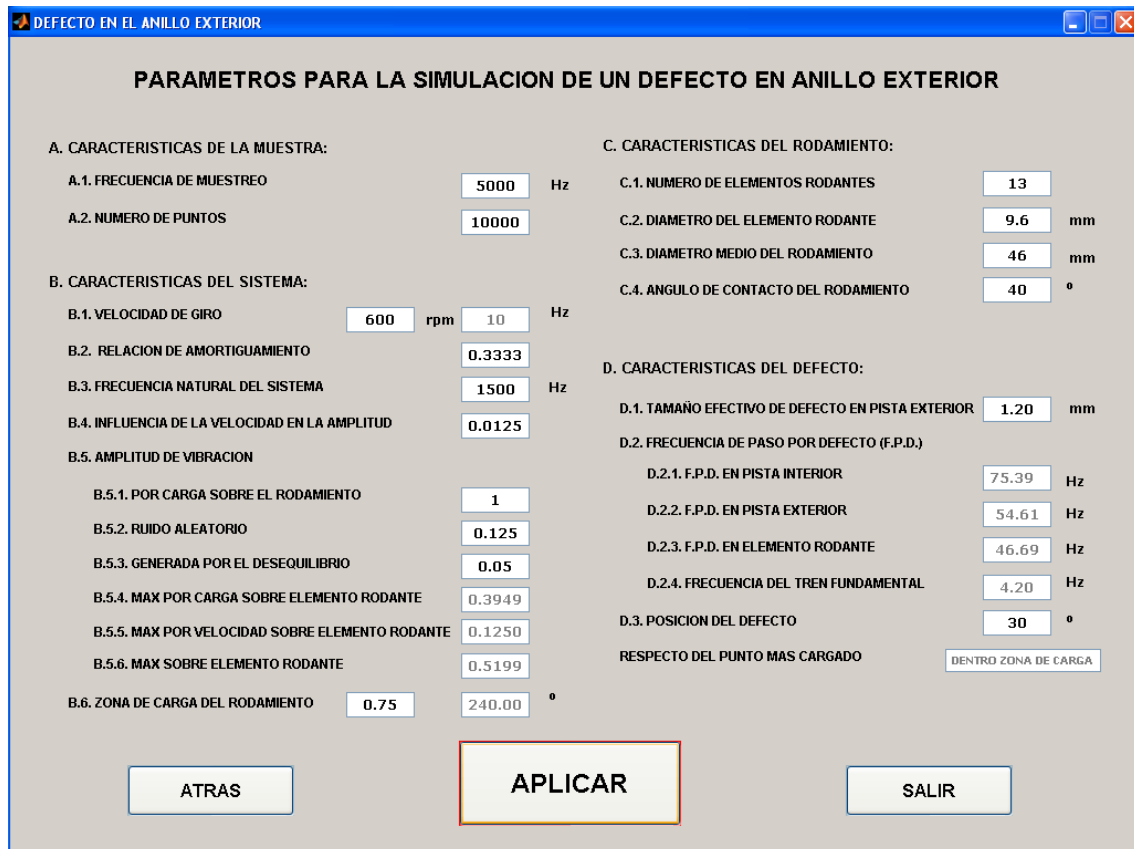
La segunda figura comprende dos gráficos de dominio frecuencial, el primero es el espectro de potencia de la señal y en el segundo se representa el espectro de envolvente de la señal.

En la parte superior de las figuras existen las herramientas de edición, zoom, opciones de editar líneas, grabar los resultados,... Estos gráficos se generan con un título que identifica el tipo de defecto que se estudia así como los parámetros más importantes, el tamaño de defecto, zona de carga y velocidad de giro.

Si, en cambio, se pulsa el botón “OTROS ANALISIS”, los resultados que se obtienen son datos estadísticos y gráficos (señal temporal, envolvente, psd, espectro envolvente, espectrograma y transformada Wavelet).

3.1. Defecto en anillo exterior

En la Figura 5.48. se representan los parámetros tomados para realizar las gráficas del análisis. Se dividen en los cuatro grupos principales descritos. En la Figura 5.49.a y b se representan las gráficas de resultados para los parámetros introducidos.



PARAMETROS PARA LA SIMULACION DE UN DEFECTO EN ANILLO EXTERIOR

A. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:

A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO: 5000 Hz

A.2. NUMERO DE PUNTOS: 10000

B. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA:

B.1. VELOCIDAD DE GIRO: 600 rpm, 10 Hz

B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO: 0.3333

B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA: 1500 Hz

B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD: 0.0125

B.5. AMPLITUD DE VIBRACION:

B.5.1. POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO: 1

B.5.2. RUIDO ALEATORIO: 0.125

B.5.3. GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO: 0.05

B.5.4. MAX POR CARGA SOBRE ELEMENTO RODANTE: 0.3949

B.5.5. MAX POR VELOCIDAD SOBRE ELEMENTO RODANTE: 0.1250

B.5.6. MAX SOBRE ELEMENTO RODANTE: 0.5199

B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO: 0.75, 240.00 °

C. CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO:

C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES: 13

C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE: 9.6 mm

C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO: 46 mm

C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO: 40 °

D. CARACTERISTICAS DEL DEFECTO:

D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA EXTERIOR: 1.20 mm

D.2. FRECUENCIA DE PASO POR DEFECTO (F.P.D.):

D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR: 75.39 Hz

D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR: 54.61 Hz

D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE: 46.69 Hz

D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL: 4.20 Hz

D.3. POSICION DEL DEFECTO: 30 °

RESPECTO DEL PUNTO MAS CARGADO: DENTRO ZONA DE CARGA

Buttons: ATRAS, APLICAR, SALIR

Figura 5.48. Parámetros necesarios para la simulación de defecto en el anillo exterior del rodamiento.

3.1.1. Resultados gráficos

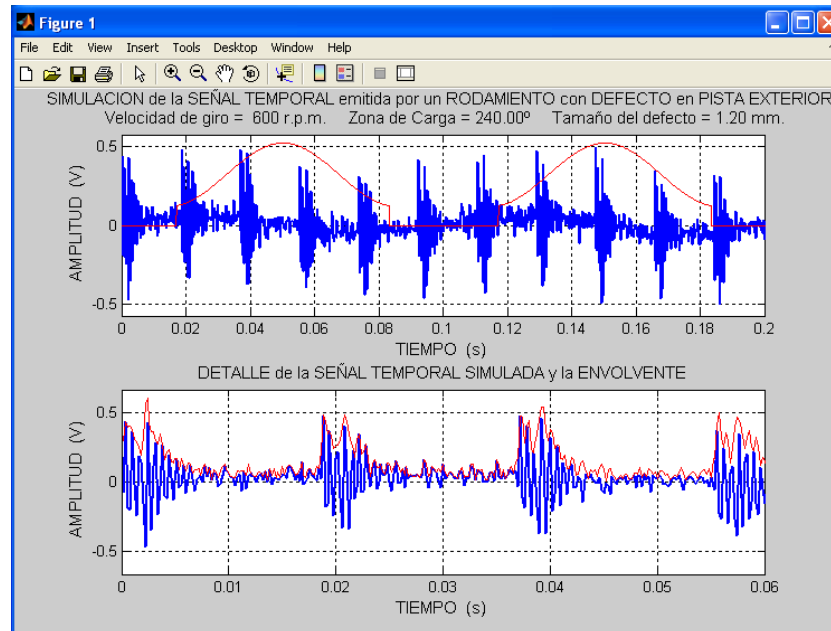


Figura 5.49.a. Gráficas de resultados temporales de la simulación de defecto en anillo exterior, añadiendo ruido aleatorio y defectos distribuidos.

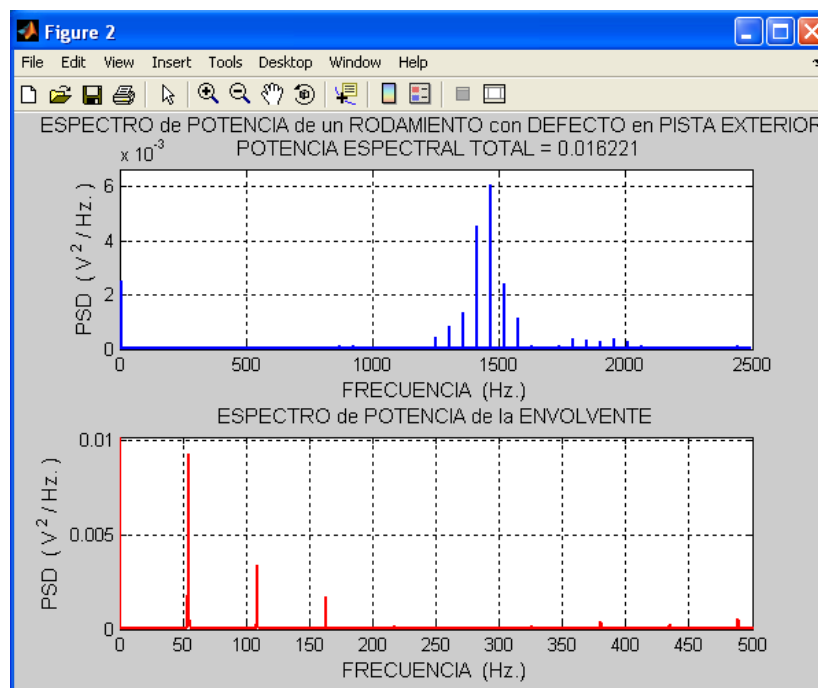


Figura 5.49.b. Gráficas de resultados frecuenciales de la simulación de defecto en anillo exterior.

3.1.2. Resultados estadísticos



Figura 5.50. Datos estadísticos obtenidos de los datos de la simulación de defecto en anillo exterior.

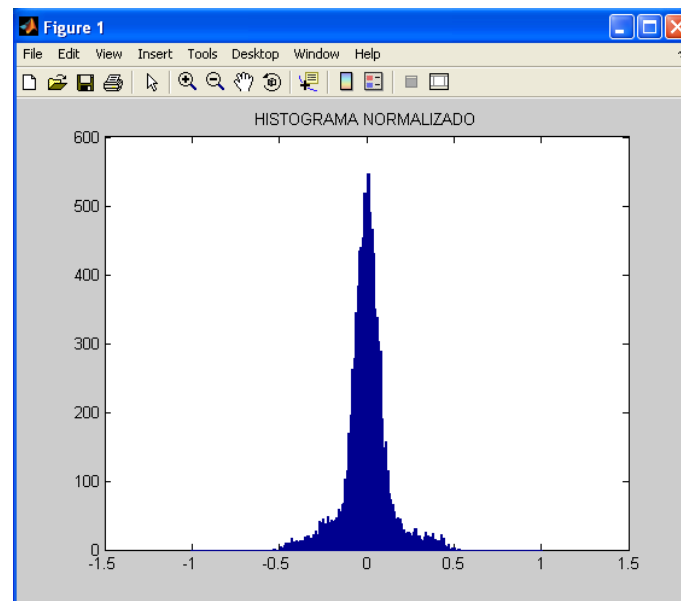


Figura 5.51. Histograma normalizado obtenido de los datos de simulación de defecto en anillo exterior.

3.1.3. Gráficos

No se mostrará los detalles de los siguientes gráficos, ya que se han mostrado en el apartado “1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEDIANTE UN FICHERO DE DATOS”.

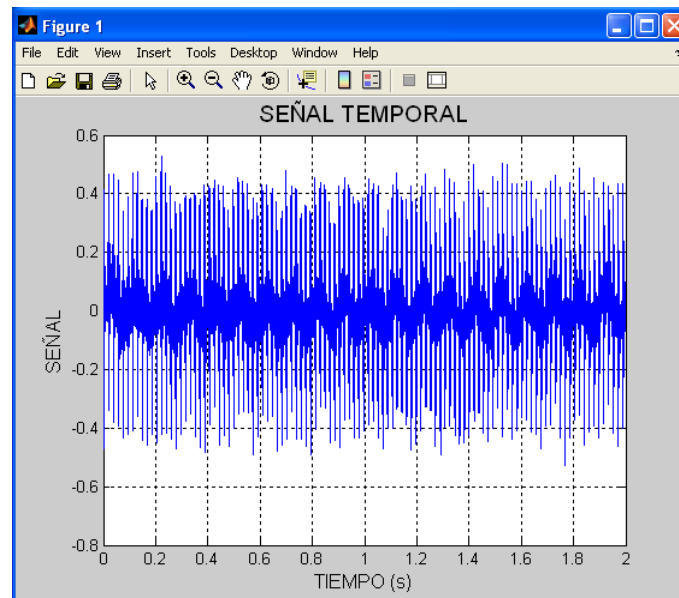


Figura 5.52. Señal temporal de datos obtenidos de simulación de defecto en anillo exterior.

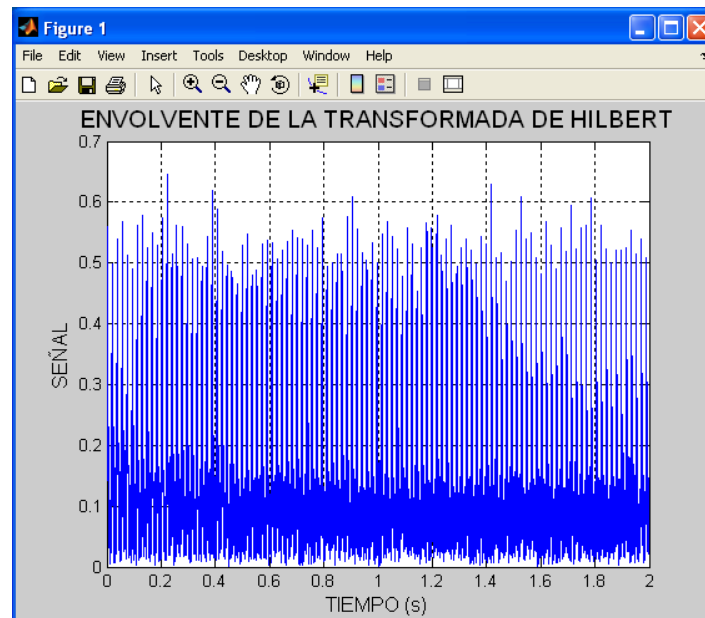


Figura 5.53. Envolvente de datos obtenidos de la simulación de defecto en anillo exterior.

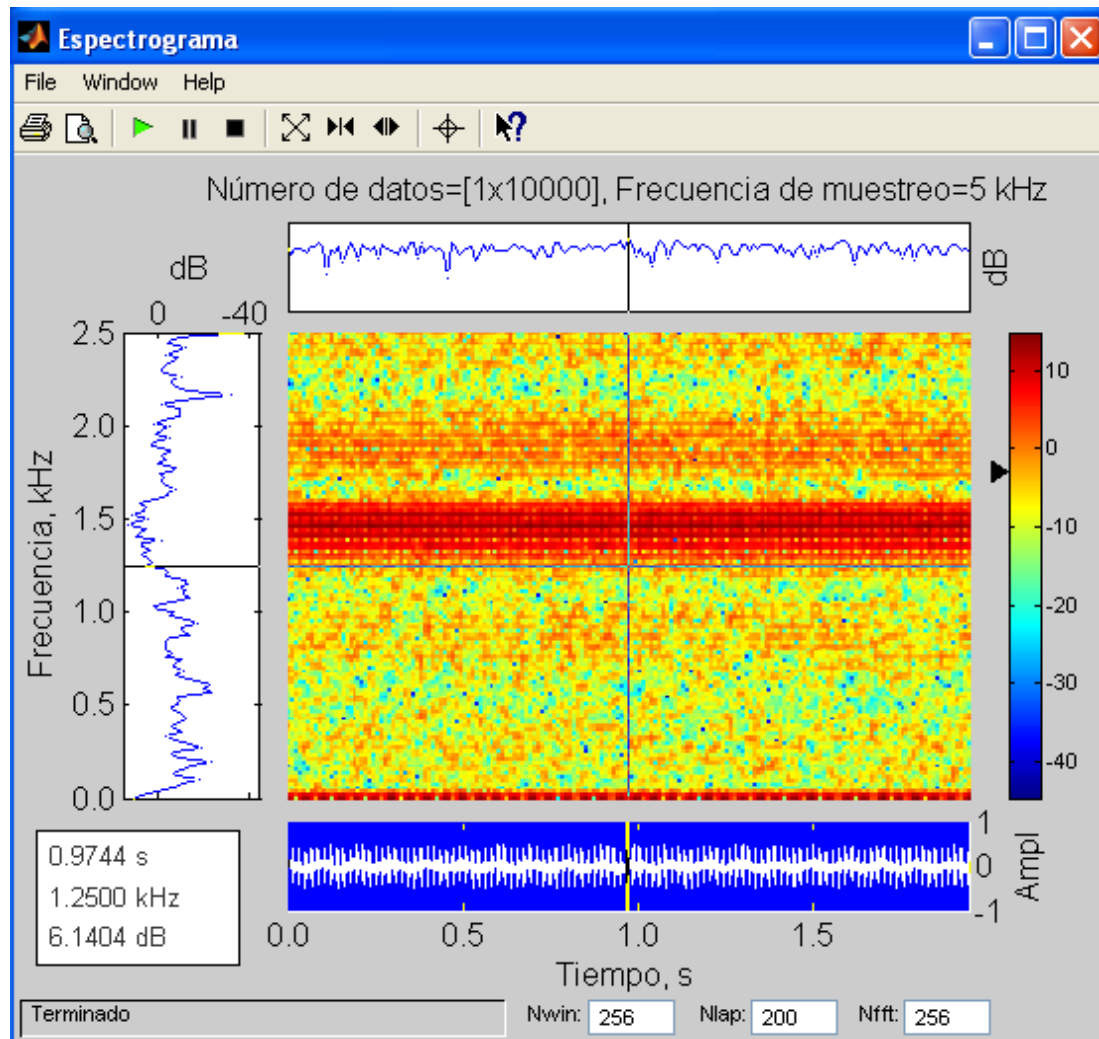


Figura 5.54. Espectrograma de datos obtenidos en simulación de defecto en anillo exterior.

3.1.4. Transformada Wavelet

Al haber siete tipos de Wavelet madre y puesto que algunos de estos tipos tienen varias órdenes. Como se ha visto en el apartado “2. TRANSFORMADA WAVELET” se han seleccionado solamente dos tipos: Mexican Hat y Daubechies de orden 10 de escala 128.

En el apartado dos se han expuesto todas las gráficas correspondientes a la Transformada de Wavelet. Al ser tan numerosas y puesto que se pueden considerar conocidas, únicamente se representan ahora dos de ellas. Una relativa a la Wavelet madre de orden único y otra de Wavelet madre de orden múltiple.

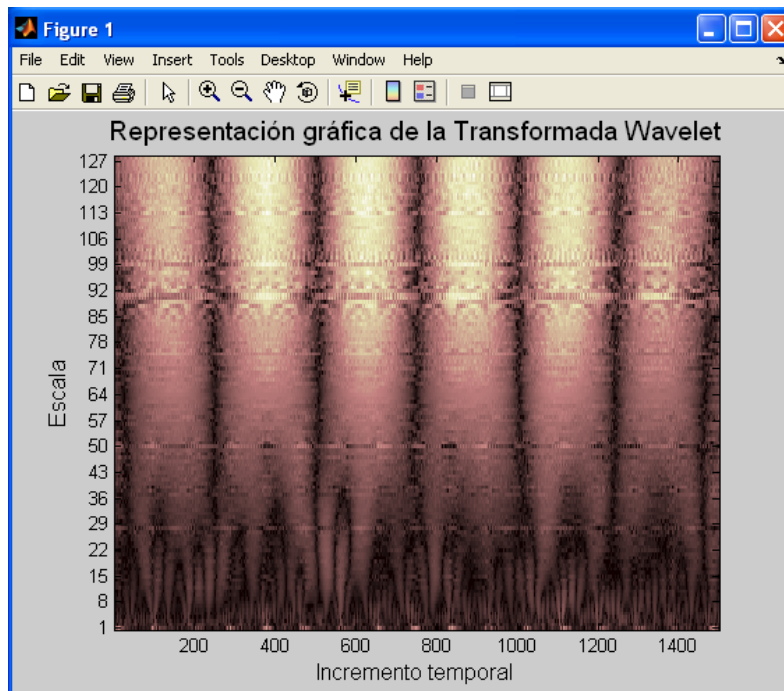


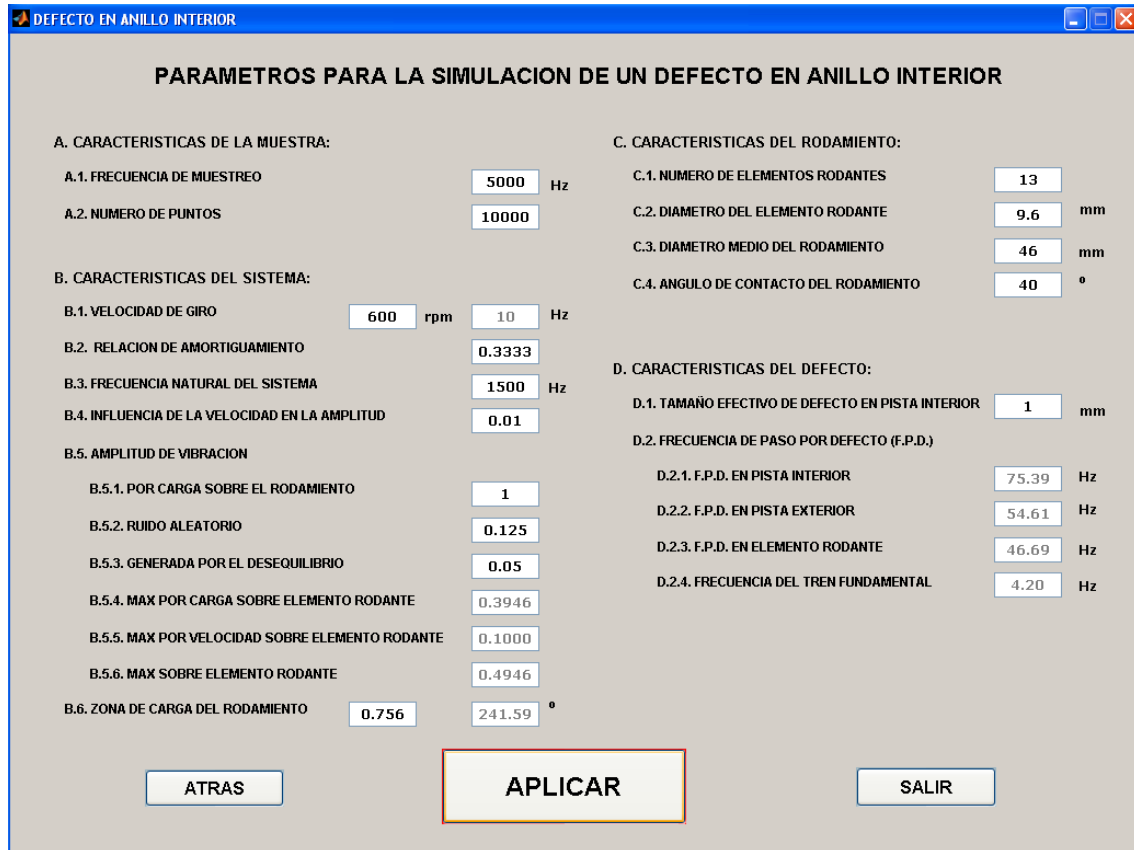
Figura 5.55. Mexican Hat.



Figura 5.56. Daubechies 10.

3.2. Defecto en anillo interior

Los parámetros correspondientes a este defecto son similares a los presentados para la simulación por defecto en anillo exterior. Se representan en la Figura 5.57.



PARAMETROS PARA LA SIMULACION DE UN DEFECTO EN ANILLO INTERIOR			
A. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:			
A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO	5000	Hz	
A.2. NUMERO DE PUNTOS	10000		
B. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA:			
B.1. VELOCIDAD DE GIRO	600	rpm	10 Hz
B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO	0.3333		
B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA	1500	Hz	
B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD	0.01		
B.5. AMPLITUD DE VIBRACION			
B.5.1. POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO	1		
B.5.2. RUIDO ALEATORIO	0.125		
B.5.3. GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO	0.05		
B.5.4. MAX POR CARGA SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.3946		
B.5.5. MAX POR VELOCIDAD SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.1000		
B.5.6. MAX SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.4946		
B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO	0.756		241.59 °
C. CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO:			
C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES	13		
C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE	9.6	mm	
C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO	46	mm	
C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO	40	°	
D. CARACTERISTICAS DEL DEFECTO:			
D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN PISTA INTERIOR	1	mm	
D.2. FRECUENCIA DE PASO POR DEFECTO (F.P.D.)			
D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR	75.39	Hz	
D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR	54.61	Hz	
D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE	46.69	Hz	
D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL	4.20	Hz	

Buttons: ATRÁS, APLICAR, SALIR

Figura 5.57. Parámetros necesarios para la simulación de defecto en anillo interior.

3.2.1. Resultados gráficos

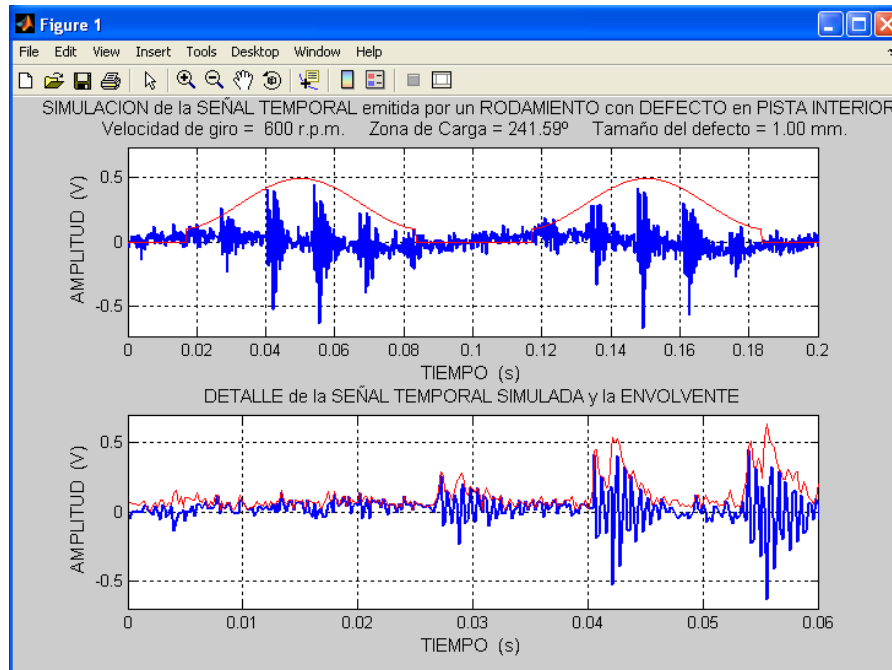


Figura 5.58.a. Gráficas de resultados temporales de la simulación de defecto en anillo interior, añadiendo ruido aleatorio y defectos distribuidos.

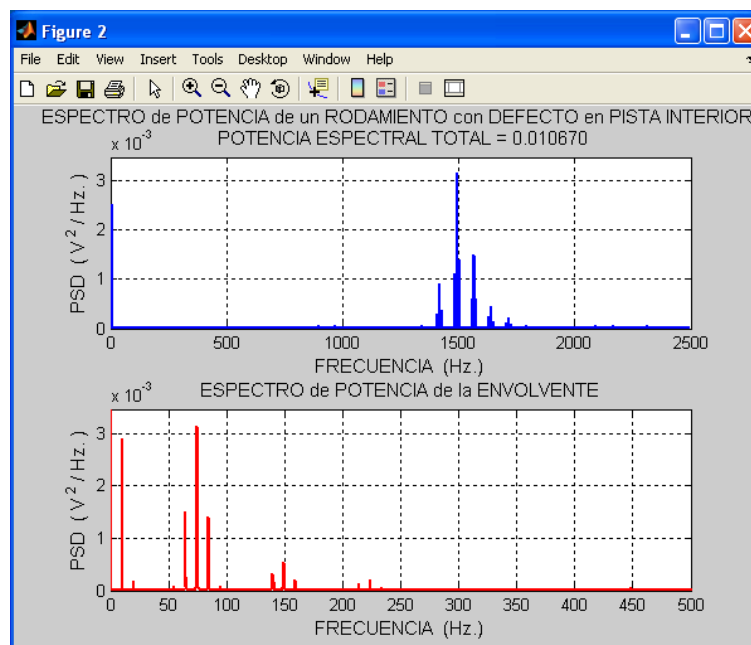


Figura 5.58.b. Gráficas de resultados frecuenciales de la simulación de defecto en anillo interior.

3.2.2. Resultados estadísticos



Figura 5.59. Datos estadísticos de datos obtenidos de la simulación de defecto en anillo interior.

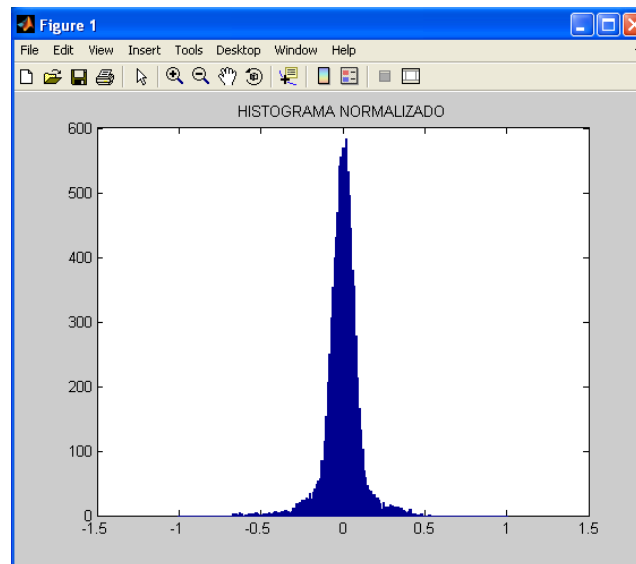


Figura 5.60. Histograma normalizado de los datos obtenidos en la simulación de defecto en anillo interior.

3.2.3. Gráficos

No se mostrarán los detalles de los siguientes gráficos, ya que se han mostrado en el apartado “1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEDIANTE UN FICHERO DE DATOS”.

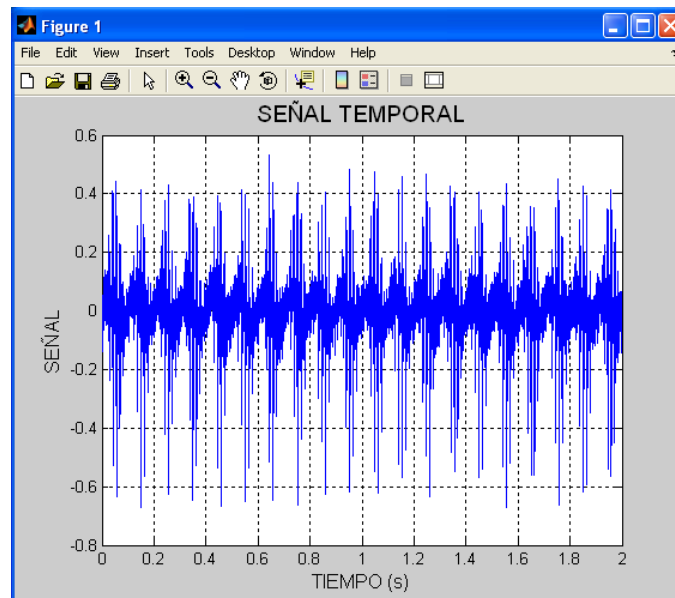


Figura 5.61. Señal temporal de datos obtenidos en simulación de defecto en anillo interior.

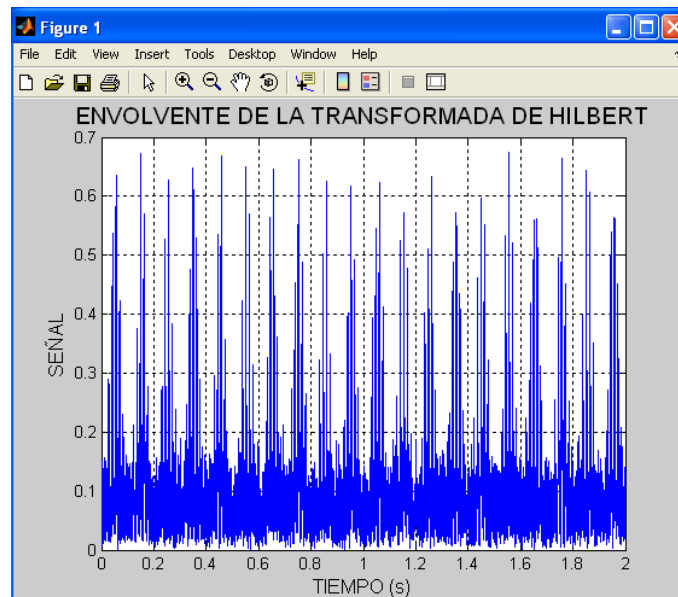


Figura 5.62. Envolvente de datos obtenidos en simulación de defecto en anillo interior.

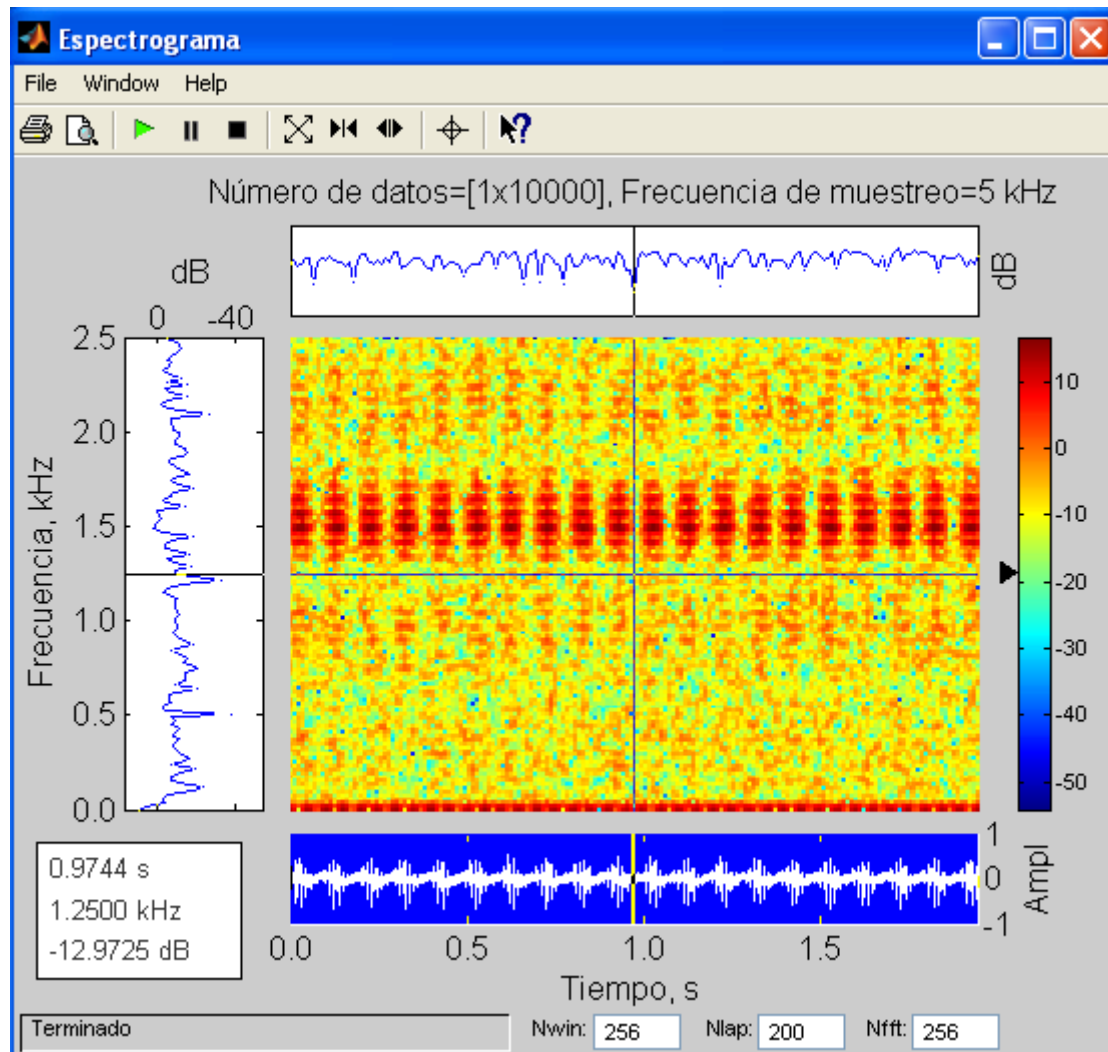


Figura 5.63. Espectrograma de datos obtenidos en simulación de defecto en anillo interior.

3.2.4. Transformada de Wavelet

Al haber siete tipos de Wavelet madre y puesto que algunos de estos tipos tienen varias órdenes. Como se ha visto en el apartado “2. TRANSFORMADA WAVELET” se han seleccionado solamente dos tipos: Meyer y Symlet de orden 7 de escala 1024.

En el apartado dos se han expuesto todas las gráficas correspondientes a la Transformada de Wavelet. Al ser tan numerosas y puesto que se pueden considerar conocidas, únicamente se representan ahora dos de ellas. Una relativa a la Wavelet madre de orden único y otra de Wavelet madre de orden múltiple.

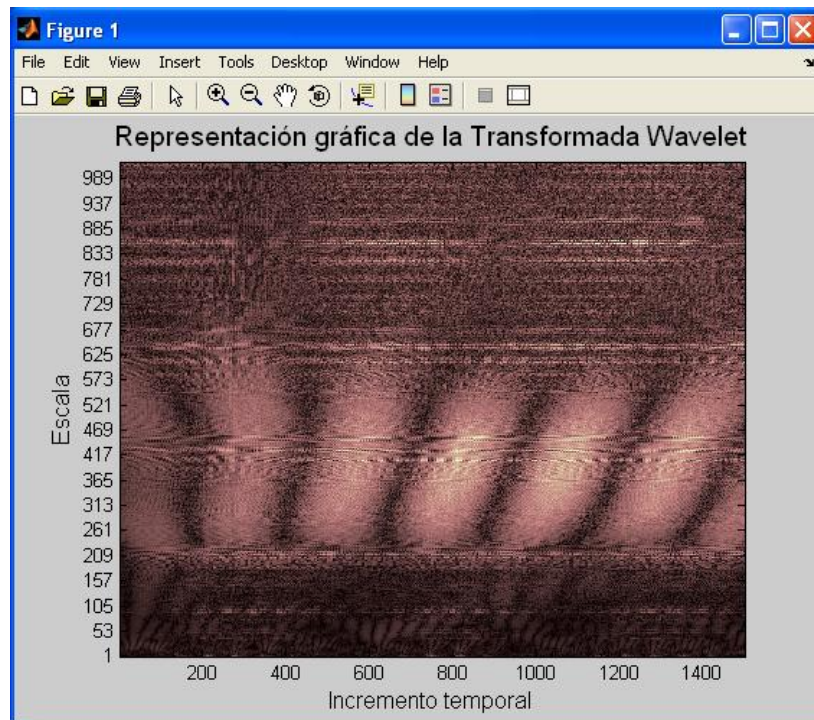


Figura 5.64. Meyer.

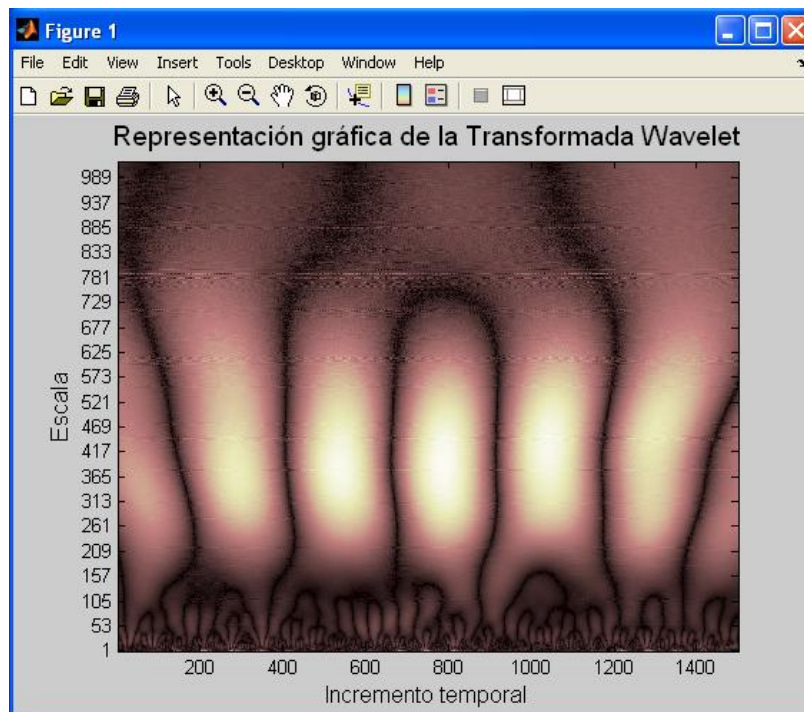
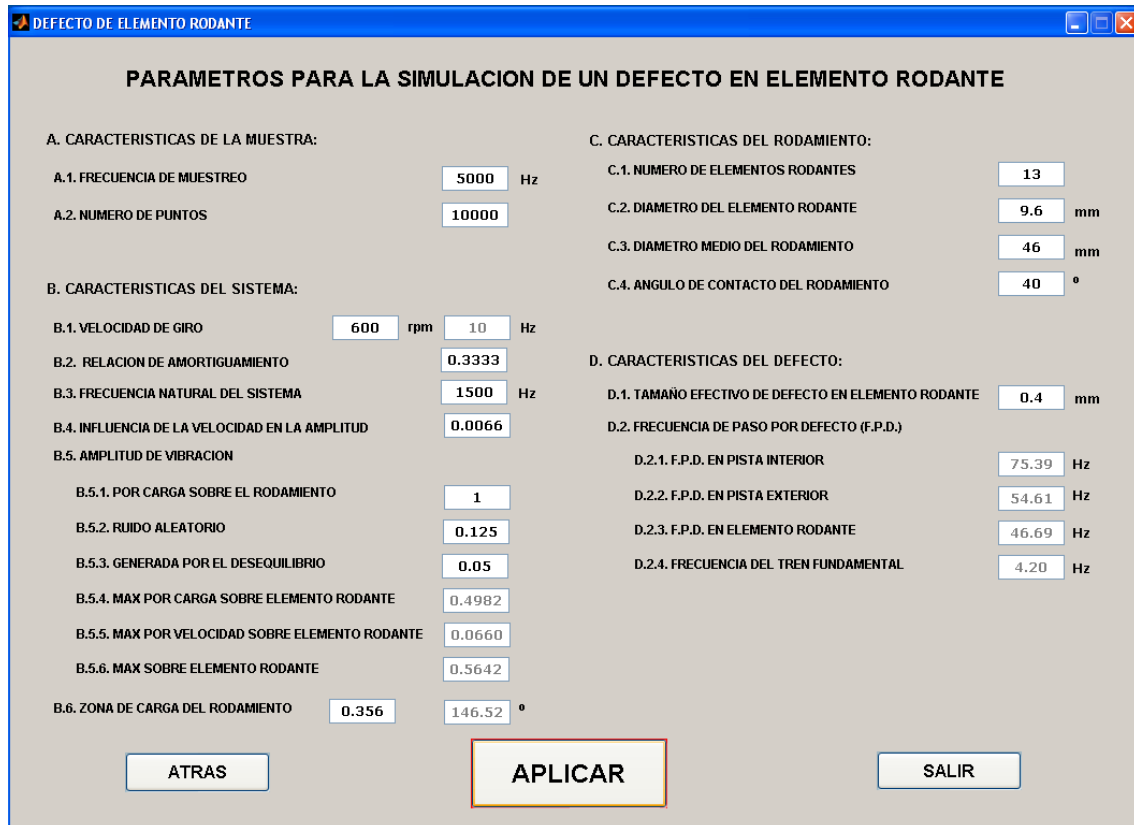


Figura 5.65. Symlet 7.

3.3. Defecto en elemento rodante

En la Figura 5.66. se observan los parámetros que la aplicación requiere para la simulación por defecto en elemento rodante. Difiere en algunos parámetros con el caso de defecto en anillo exterior.



PARAMETROS PARA LA SIMULACION DE UN DEFECTO EN ELEMENTO RODANTE			
A. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA:			
A.1. FRECUENCIA DE MUESTREO	5000	Hz	
A.2. NUMERO DE PUNTOS	10000		
B. CARACTERISTICAS DEL SISTEMA:			
B.1. VELOCIDAD DE GIRO	600	rpm	10 Hz
B.2. RELACION DE AMORTIGUAMIENTO	0.3333		
B.3. FRECUENCIA NATURAL DEL SISTEMA	1500	Hz	
B.4. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD EN LA AMPLITUD	0.0066		
B.5. AMPLITUD DE VIBRACION			
B.5.1. POR CARGA SOBRE EL RODAMIENTO	1		
B.5.2. RUIDO ALEATORIO	0.125		
B.5.3. GENERADA POR EL DESEQUILIBRIO	0.05		
B.5.4. MAX POR CARGA SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.4982		
B.5.5. MAX POR VELOCIDAD SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.0660		
B.5.6. MAX SOBRE ELEMENTO RODANTE	0.5642		
B.6. ZONA DE CARGA DEL RODAMIENTO	0.356		146.52 °
C. CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO:			
C.1. NUMERO DE ELEMENTOS RODANTES	13		
C.2. DIAMETRO DEL ELEMENTO RODANTE	9.6	mm	
C.3. DIAMETRO MEDIO DEL RODAMIENTO	46	mm	
C.4. ANGULO DE CONTACTO DEL RODAMIENTO	40	°	
D. CARACTERISTICAS DEL DEFECTO:			
D.1. TAMAÑO EFECTIVO DE DEFECTO EN ELEMENTO RODANTE	0.4	mm	
D.2. FRECUENCIA DE PASO POR DEFECTO (F.P.D.)			
D.2.1. F.P.D. EN PISTA INTERIOR	75.39	Hz	
D.2.2. F.P.D. EN PISTA EXTERIOR	54.61	Hz	
D.2.3. F.P.D. EN ELEMENTO RODANTE	46.69	Hz	
D.2.4. FRECUENCIA DEL TREN FUNDAMENTAL	4.20	Hz	

ATRAS APLICAR SALIR

Figura 5.66. Parámetros para la simulación de defecto en elemento rodante.

3.3.1. Resultados gráficos

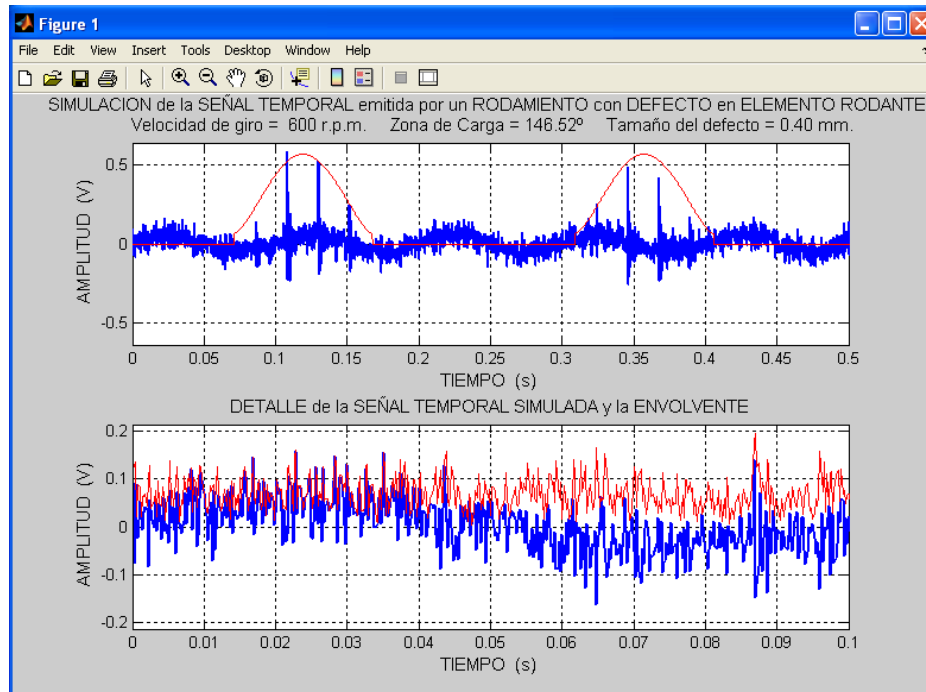


Figura 5.67.a. Gráficas de resultados temporales de la simulación de defecto en elemento rodante, añadiendo ruido aleatorio y defectos distribuidos.

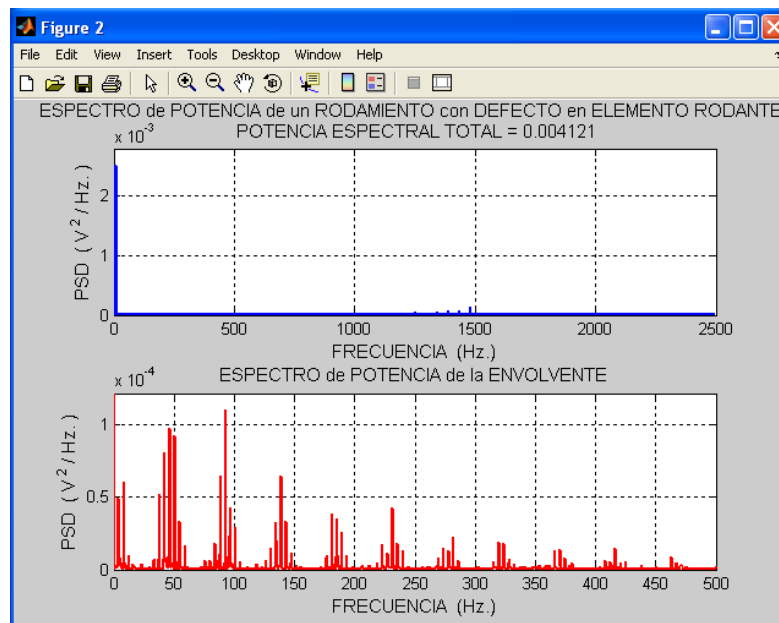


Figura 5.67.b. Gráficas de resultados frecuenciales de la simulación de defecto en elemento rodante.

3.3.2. Resultados estadísticos



Figura 5.68. Datos estadísticos de datos obtenidos de simulación de defecto en elemento rodante.

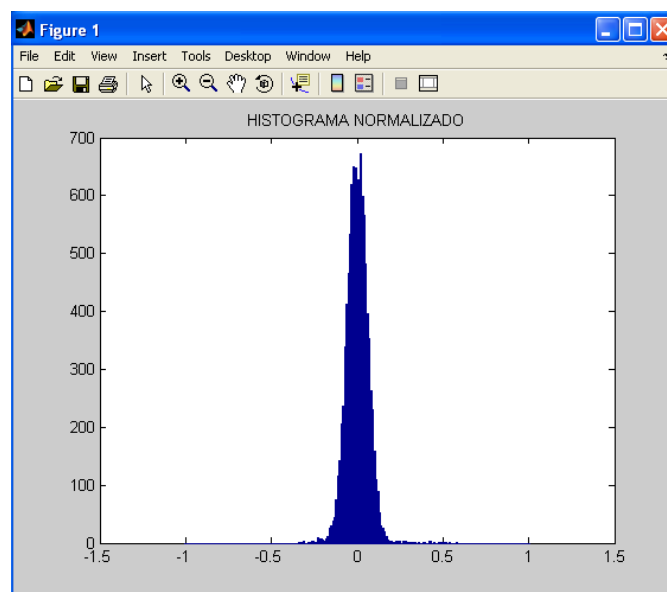


Figura 5.69. Histograma normalizado de datos obtenidos de simulación de defecto en elemento rodante.

3.3.3. Gráficos

No se mostrará los detalles de los siguientes gráficos, ya que se han mostrado en el apartado “1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES MEDIANTE UN FICHERO DE DATOS”.

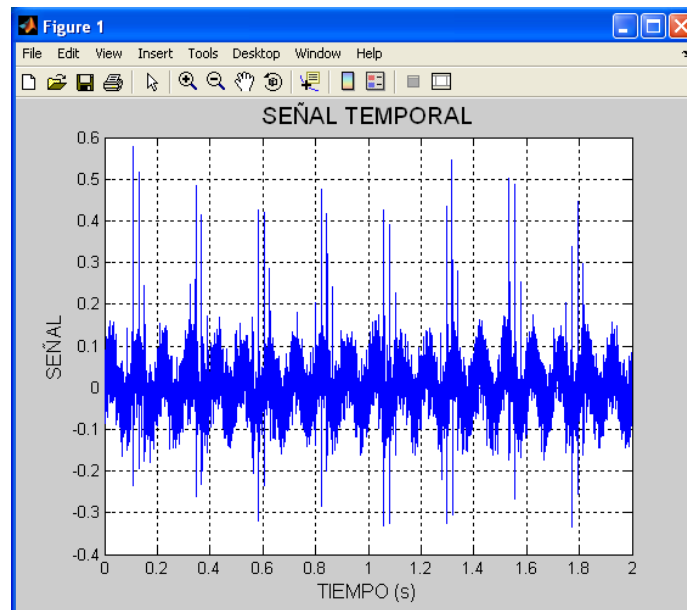


Figura 5.70. Señal temporal de datos obtenidos en simulación de defecto en elemento rodante.

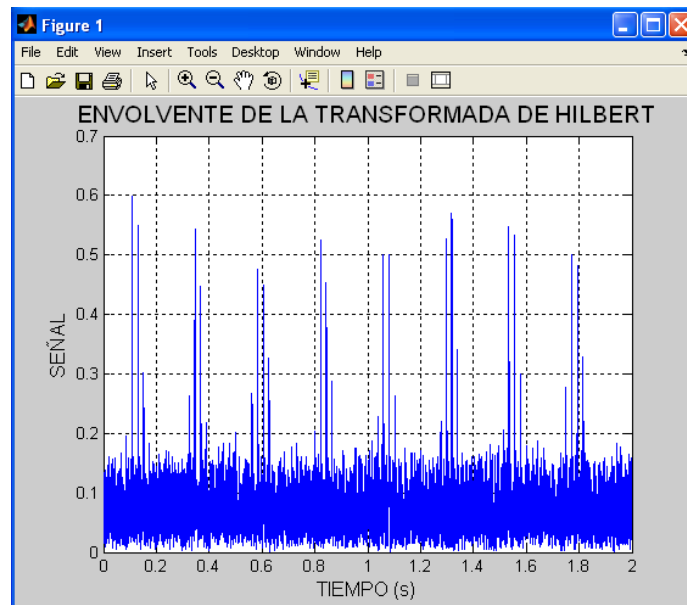


Figura 5.71. Envolvente de datos obtenidos en simulación de defecto en elemento rodante.

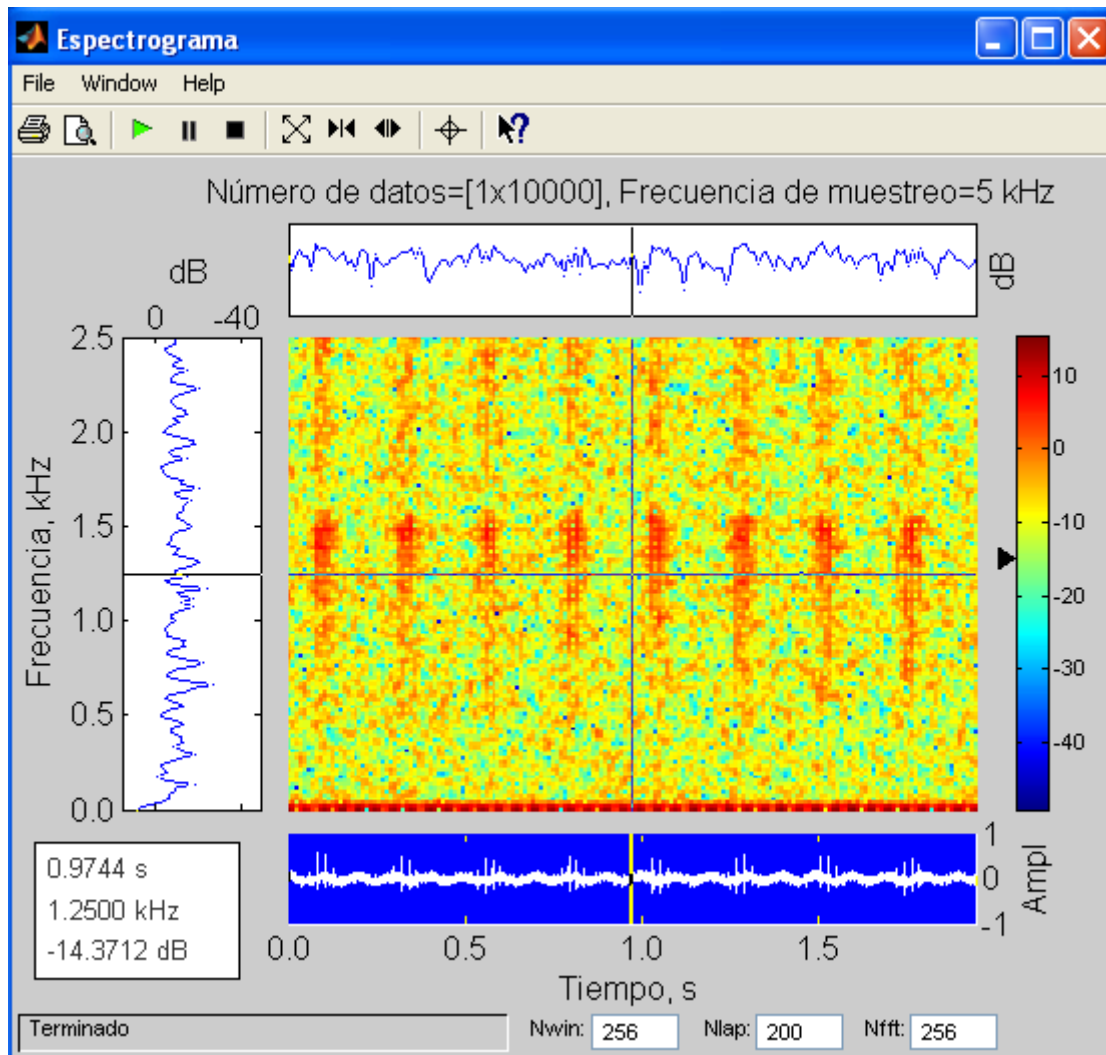


Figura 5.72. Espectrograma de datos obtenidos en simulación de defecto en elemento rodante.

3.3.4. Transformada Wavelet

Al haber siete tipos de Wavelet madre y puesto que algunos de estos tipos tienen varias órdenes. Como se ha visto en el apartado “2. TRANSFORMADA WAVELET” se han seleccionado solamente dos tipos: Morlet y Coiflet de orden 5 de escala 512.

En el apartado dos se han expuesto todas las gráficas correspondientes a la Transformada de Wavelet. Al ser tan numerosas y puesto que se pueden considerar conocidas, únicamente se representan ahora dos de ellas. Una relativa a la Wavelet madre de orden único y otra de Wavelet madre de orden múltiple.

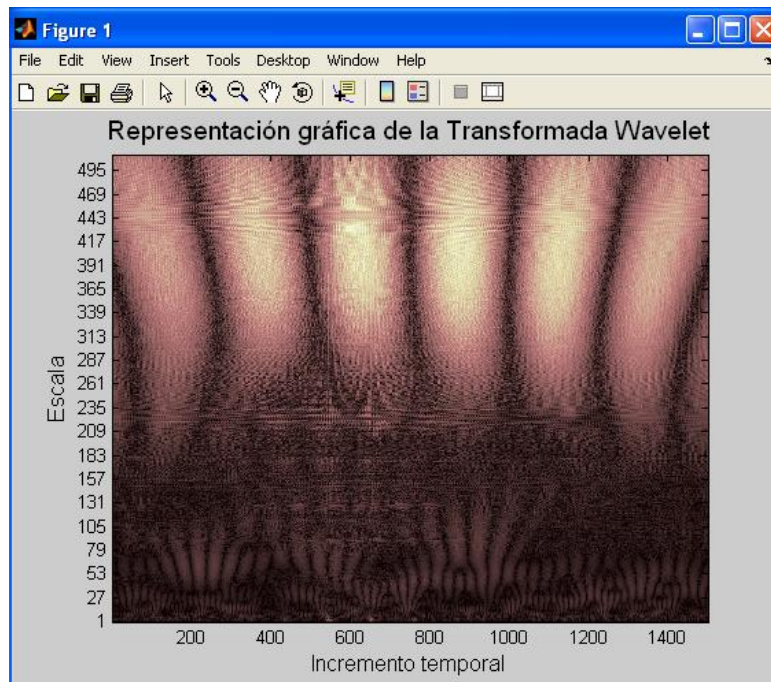


Figura 5.73. Morlet.

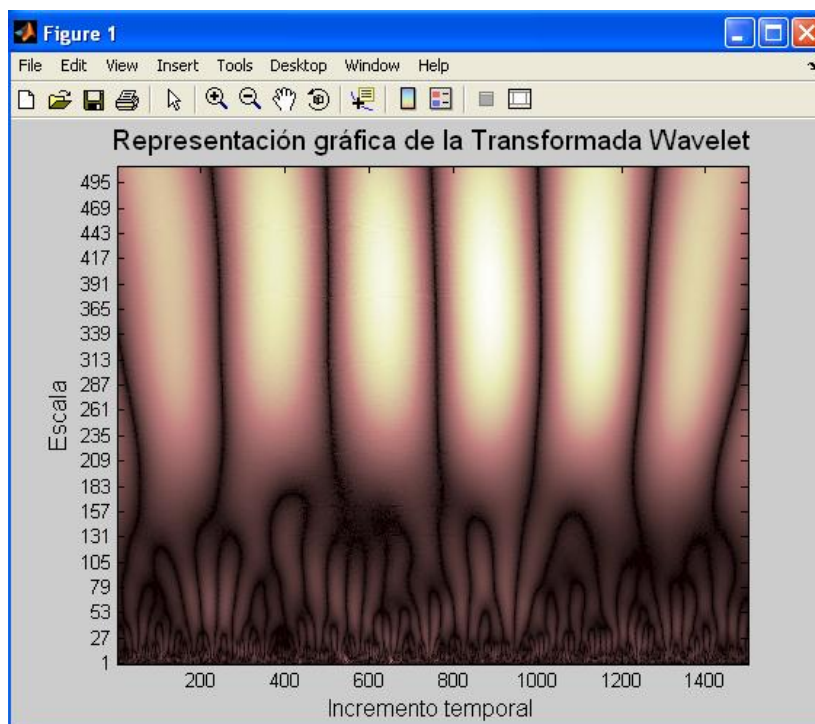


Figura 5.74. Coiflet 5.

Capítulo VI:

JUEGOS DE

PRUEBAS



VI. JUEGOS DE PRUEBAS

Con el fin de mostrar la utilidad de la aplicación para el análisis de vibraciones y la simulación de defectos en rodamientos, se expone un juego de pruebas. Se trata de representar resultados según las distintas posibilidades del ADEVI 3.1 para comprobar su funcionamiento y poder comparar entre las diferentes maneras de análisis que ofrece la aplicación.

El capítulo se divide en dos partes. En la primera se analizan las gráficas señal temporal, PSD, envolvente, espectro de la envolvente, espectrograma y transformada Wavelet, así como el análisis estadístico de tres ficheros de datos diferentes. Uno de ellos contiene los datos de la vibración de un rodamiento defectuoso en anillo exterior, el segundo en pista interior y el último en elemento rodante con frecuencia de muestreo de 5.000 Hz para los tres casos. Se trata de comparar las gráficas según el tipo de defecto.

La segunda parte se ocupa de la simulación de defectos en rodamientos. Se representan las gráficas y los datos correspondientes a la simulación de los tres posibles defectos, cambiando en cada uno de ellos los parámetros correspondientes para que se pueda comprobar su incidencia en las gráficas finales.

1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

1.1. Análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en anillo exterior

DATOS A ANALIZAR

- El fichero de datos a analizar es: EV1200S5.DAT (E: defecto en anillo exterior; V: velocidad de giro; 1200: 1200 rpm o lo que es lo mismo 20 Hz; S5: numeración de cada grupo de cinco rodamientos)
- Frecuencia de muestreo de 5.000 Hz.

1.1.1. Resultados estadísticos



Figura 6.1. Datos estadísticos para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

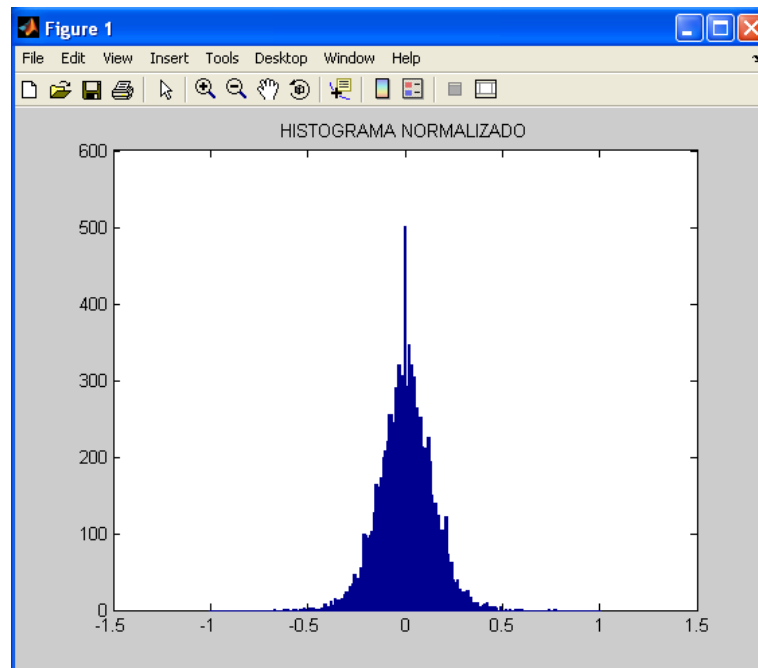


Figura 6.2. Histograma normalizado para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

1.1.2. Gráficos

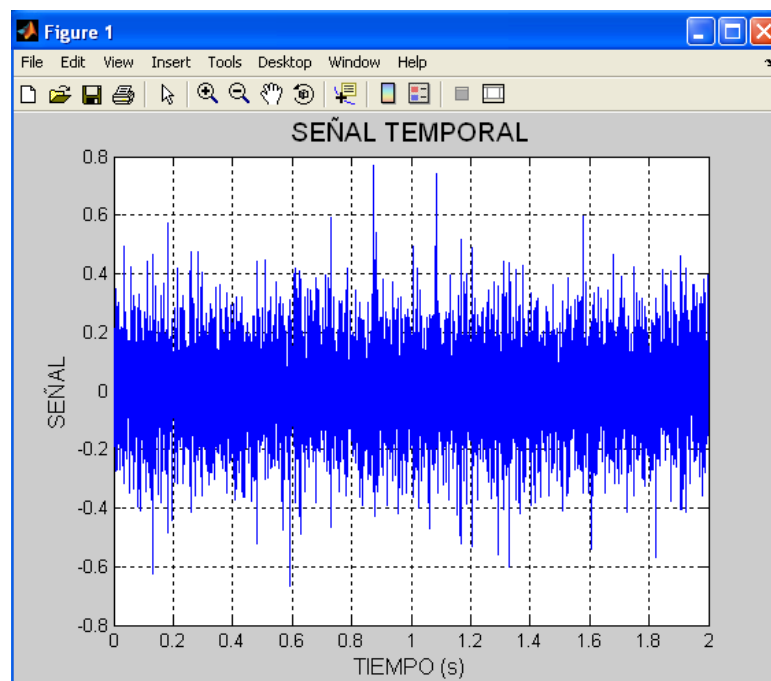


Figura 6.3. Señal temporal para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

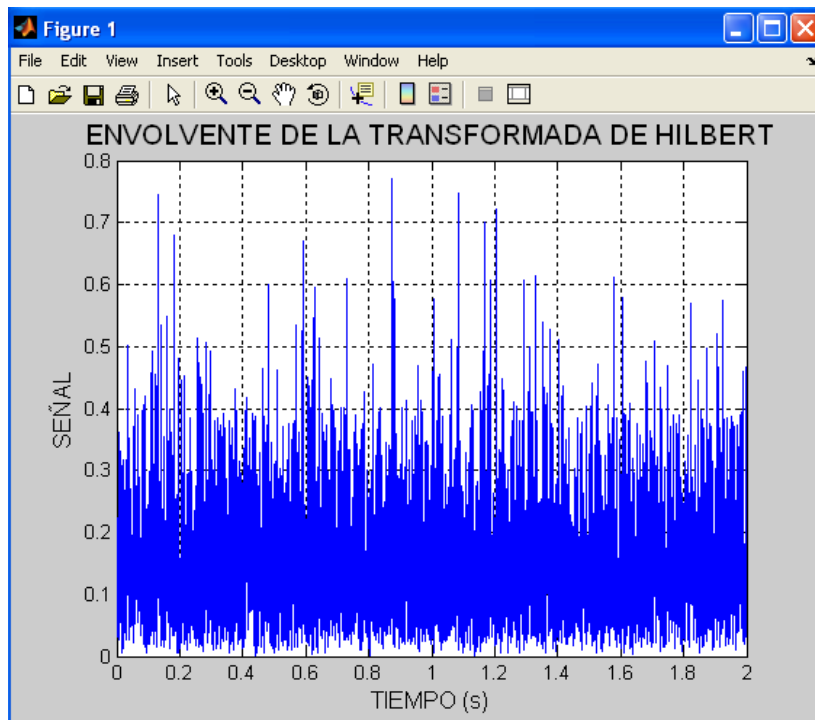


Figura 6.4. Envolvente para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

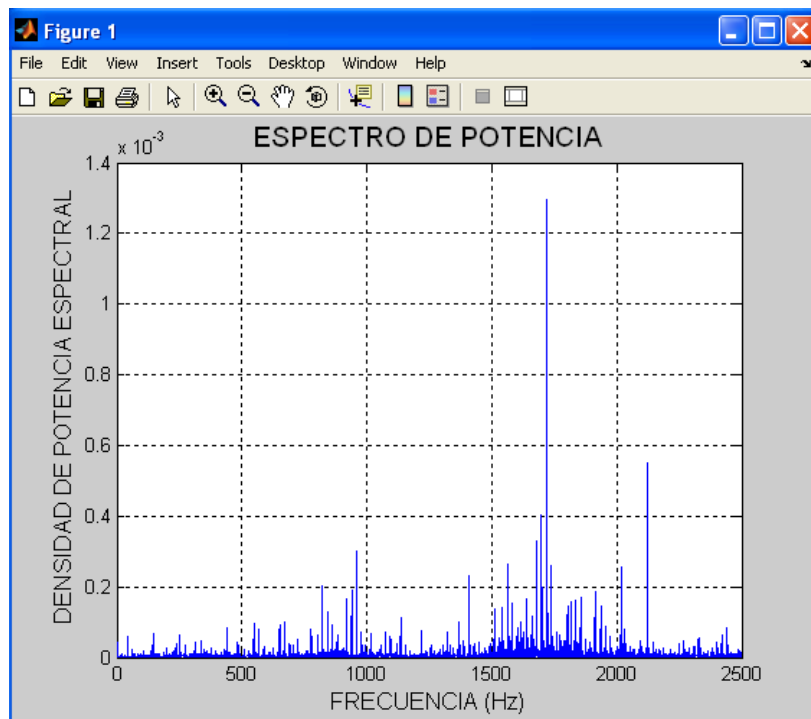


Figura 6.5. PSD para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

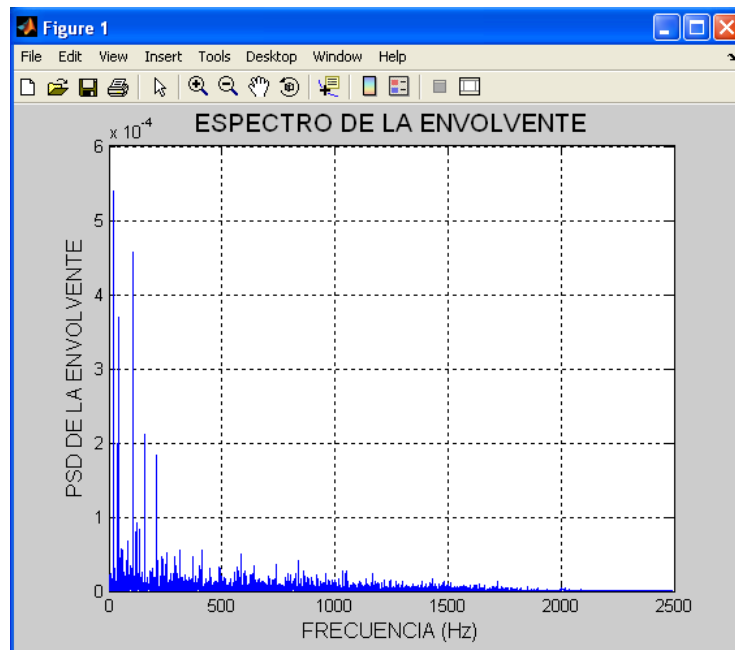


Figura 6.6. Espectro de envoltente para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

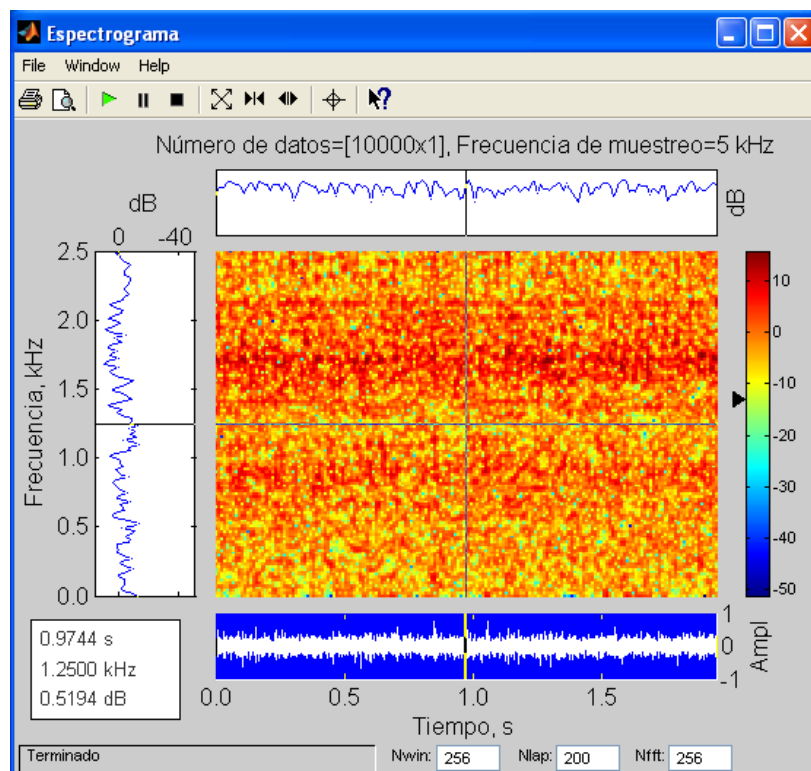


Figura 6.7. Espectrograma para un rodamiento con defecto en anillo exterior.

1.1.3. Transformada Wavelet

Para no hacer este apartado muy extenso porque como ya se vio en el capítulo 5, al haber tantos tipos de Wavelet madre y al constar alguno de ellos de varias órdenes, resultan ser muchas gráficas, lo que se va a hacer es coger dos tipos de Wavelet madre: uno de orden único y otro de varias órdenes, con escala de 256.

DATOS A ANALIZAR

Velocidad de giro: 20 Hz.

Número de vueltas 3.

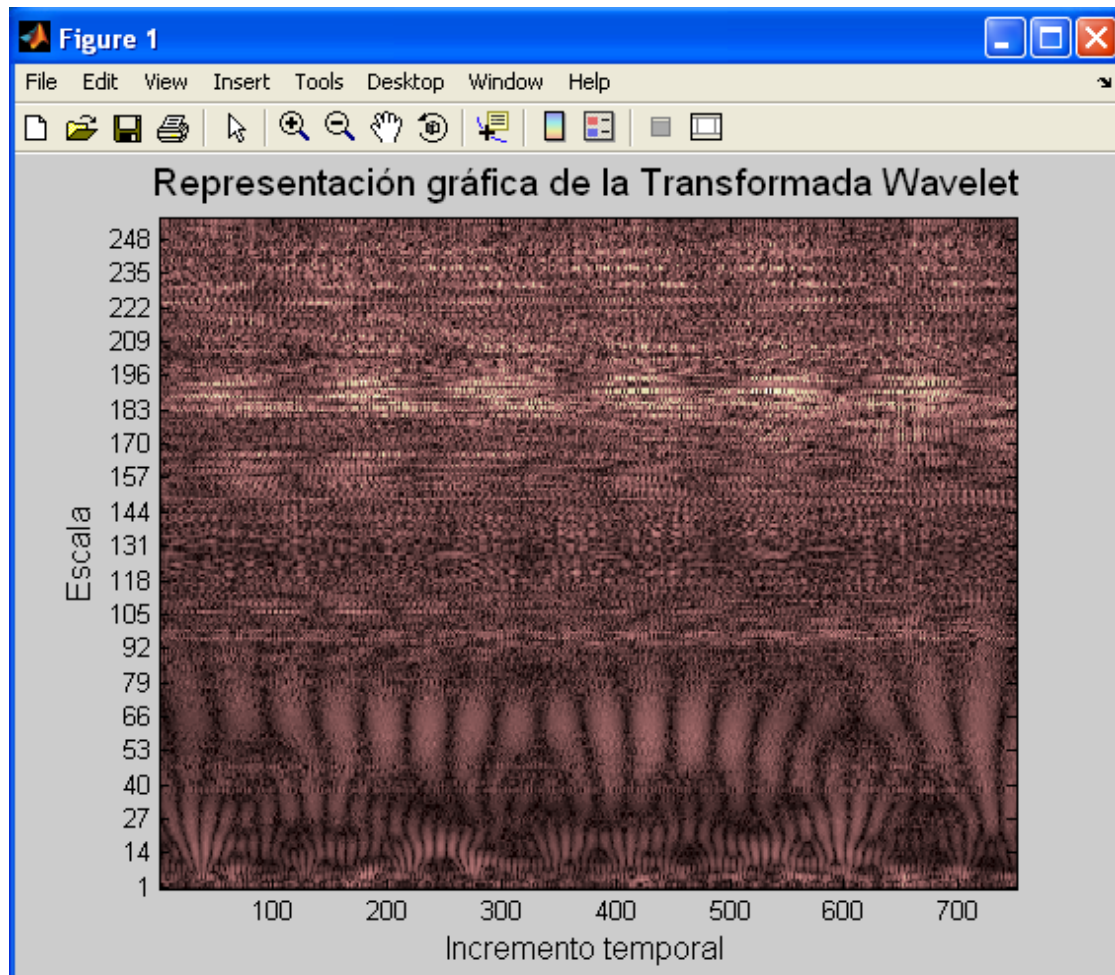


Figura 6.8. Morlet.

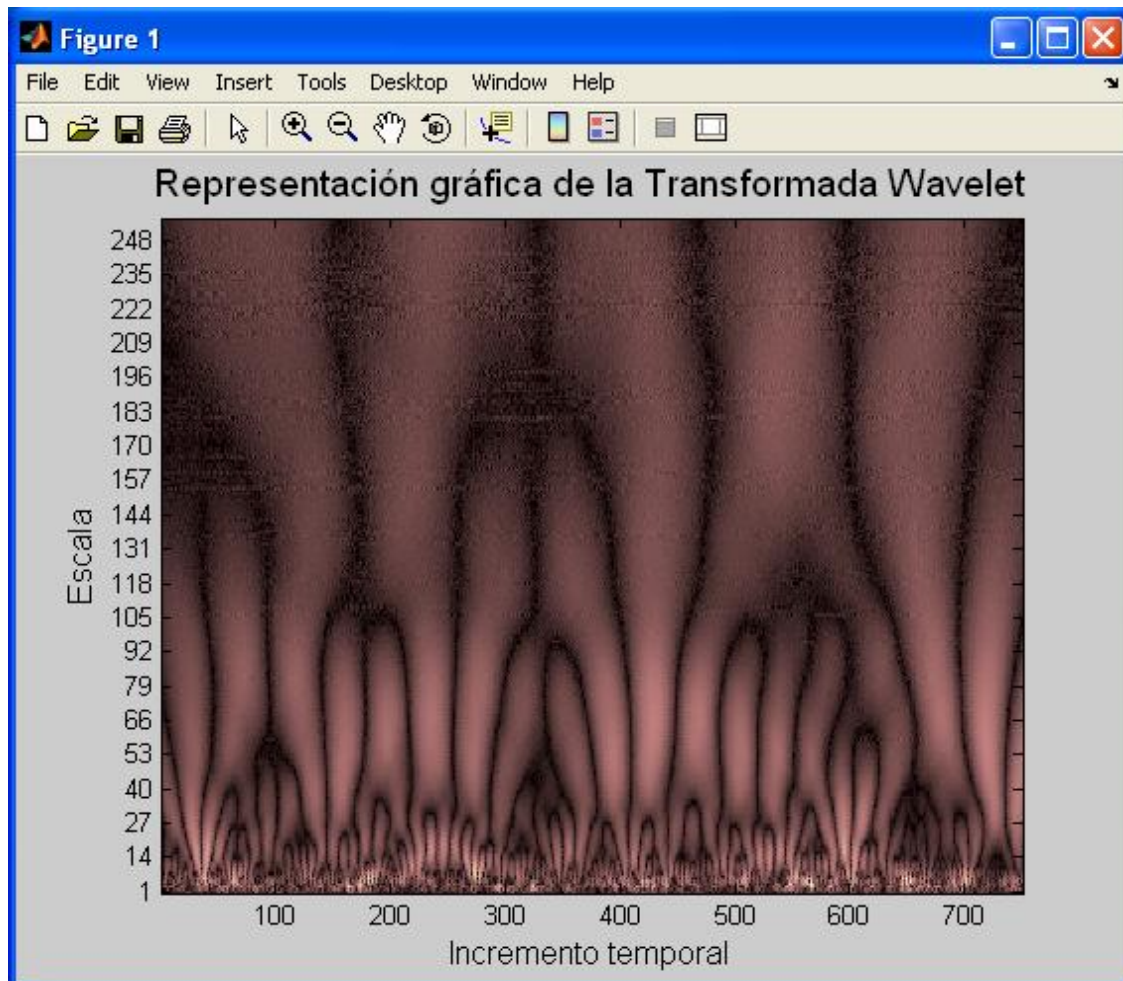


Figura 6.9. Biortogonal 6.8.

1.2. Análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en anillo interior

DATOS A ANALIZAR

- El fichero de datos a analizar es: I5V120S5.DAT (I: defecto en anillo interior; 5: 5 mm de defecto; V: velocidad de giro; 120: 1200 rpm o 20 Hz; S5: numeración de cada grupo de cinco rodamientos)
- Frecuencia de muestreo de 5.000 Hz.

1.2.1. Resultados estadísticos



Figura 6.10. Datos estadísticos para un rodamiento con defecto en anillo interior.

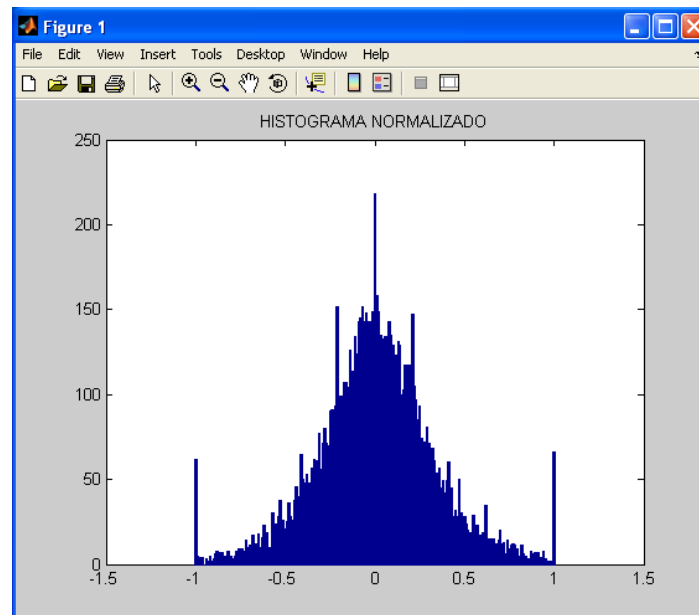


Figura 6.11. Histograma normalizado para un rodamiento con defecto en anillo interior.

1.2.2. Gráficos

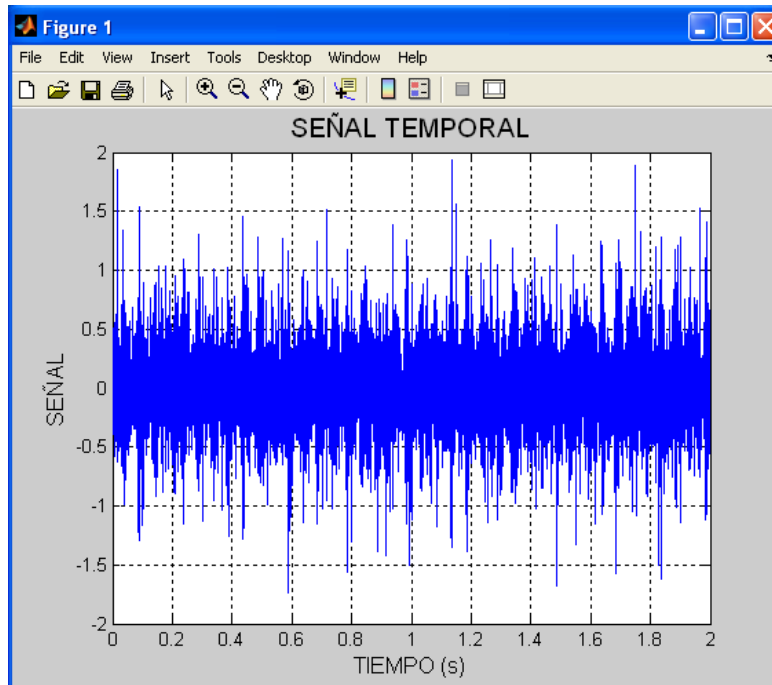


Figura 6.12. Señal temporal para un rodamiento con defecto en anillo interior.

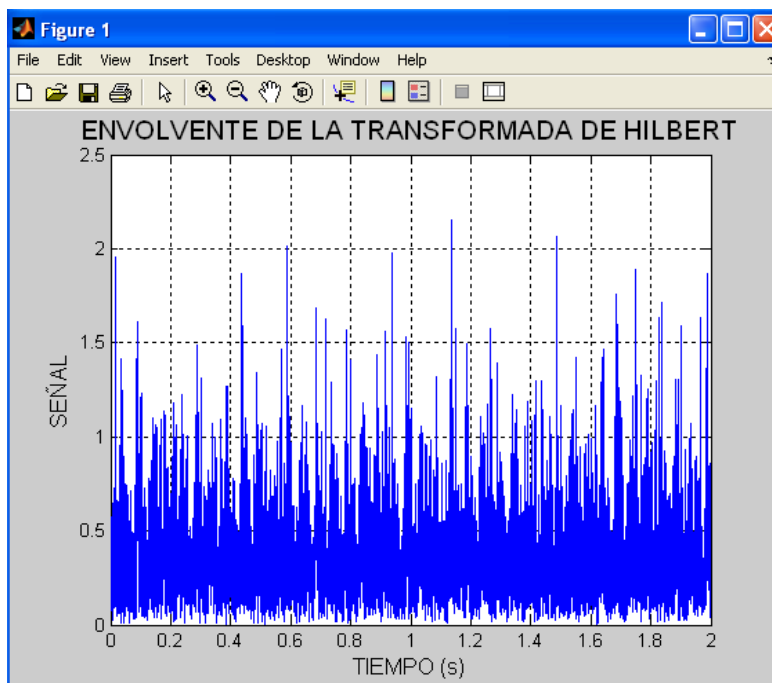


Figura 6.13. Envolvente para un rodamiento con defecto en anillo interior.

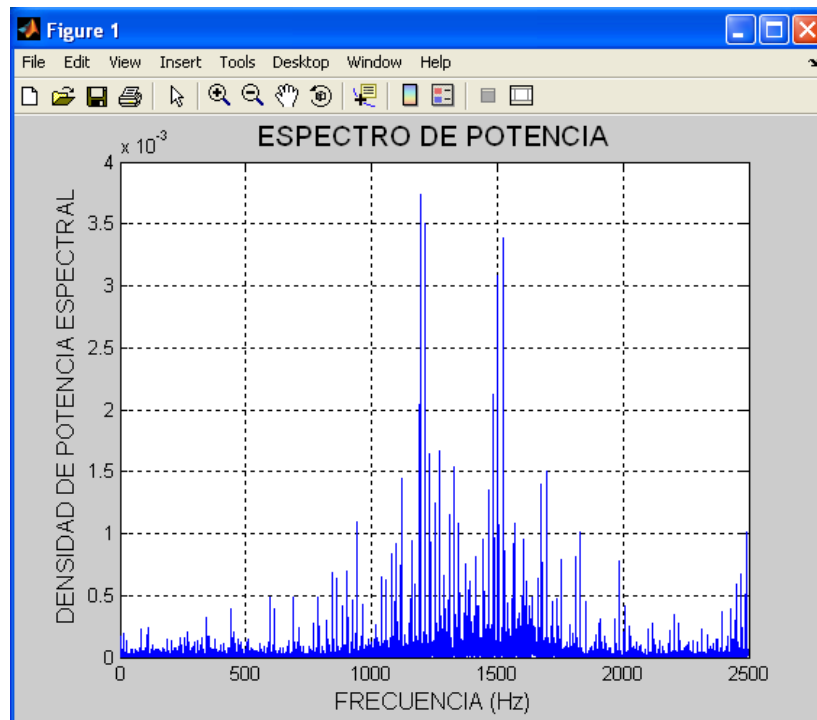


Figura 6.14. PSD para un rodamiento con defecto en anillo interior.



Figura 6.15. Espectro de envoltura para un rodamiento con defecto en pista interior.

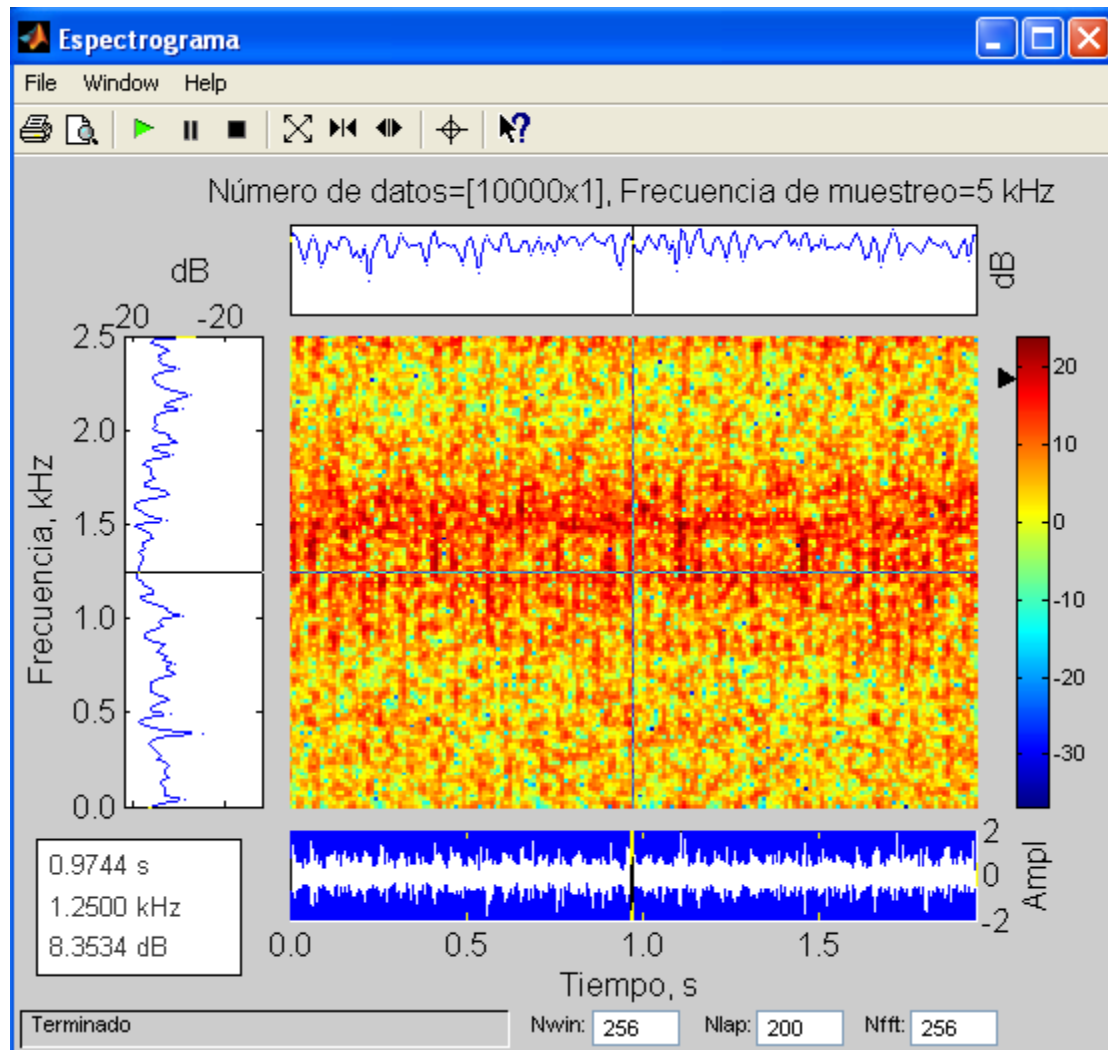


Figura 6.16. Espectrograma para un rodamiento con defecto en anillo interior.

1.2.3. Transformada Wavelet

Para poder comparar los resultados de análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en anillo exterior e interior, se representarán a continuación las mismas Wavelet que en el caso de anillo exterior y con la misma escala.

DATOS A ANALIZAR

Velocidad de giro: 20 Hz.

Número de vueltas 3.

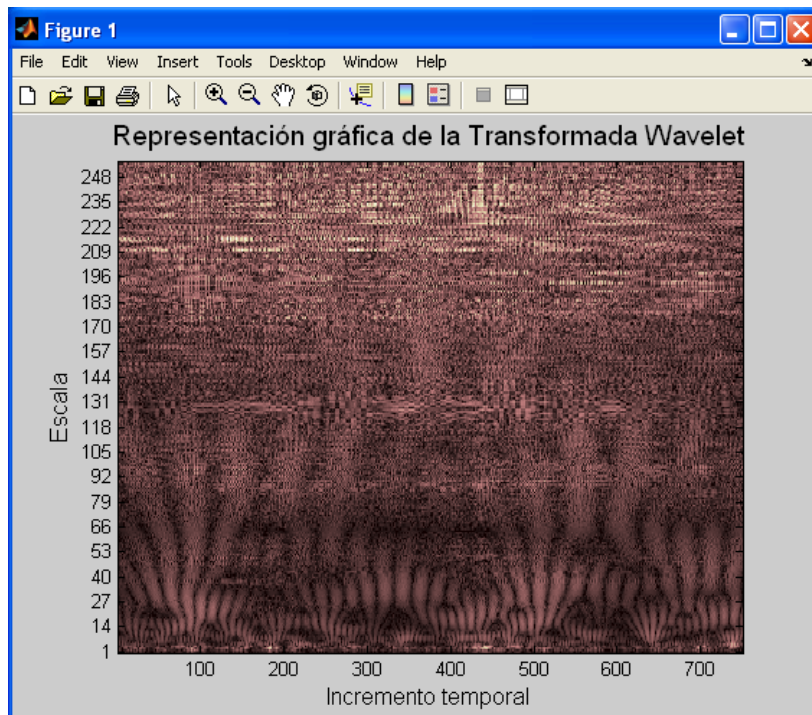


Figura 6.17. Morlet con escala 256.

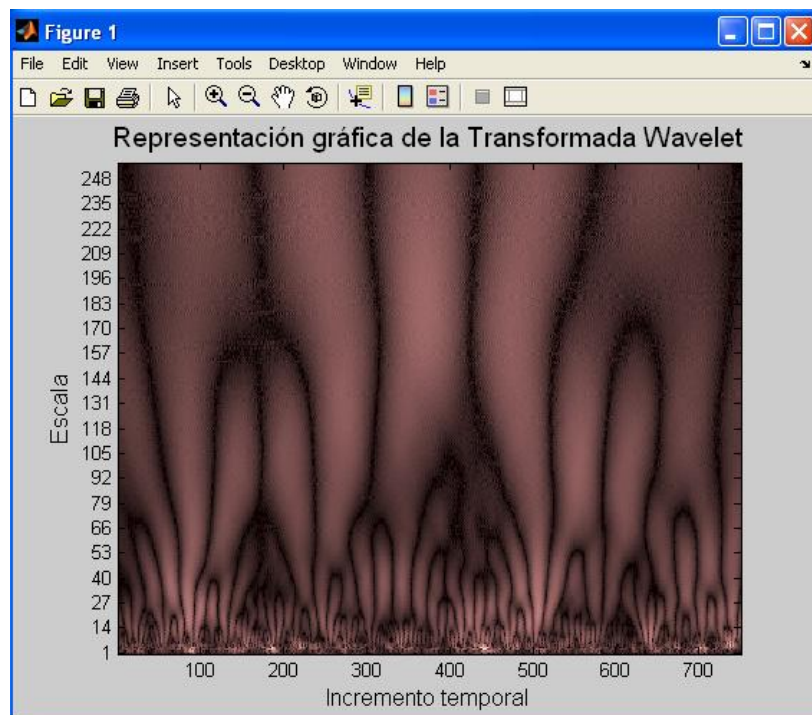


Figura 6.18. Biortogonal 6.8 con escala 256.

1.3. Análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en elemento rodante

DATOS A ANALIZAR

- El fichero de datos a analizar es: EB1200S5.DAT (EB: defecto en elemento rodante; 1200: 1200 rpm o lo que es lo mismo 20 Hz la velocidad de giro; S5: numeración de cada grupo de cinco rodamientos)
- Frecuencia de muestreo de 5.000 Hz.

1.3.1. Resultados estadísticos



Figura 6.19. Datos estadísticos para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

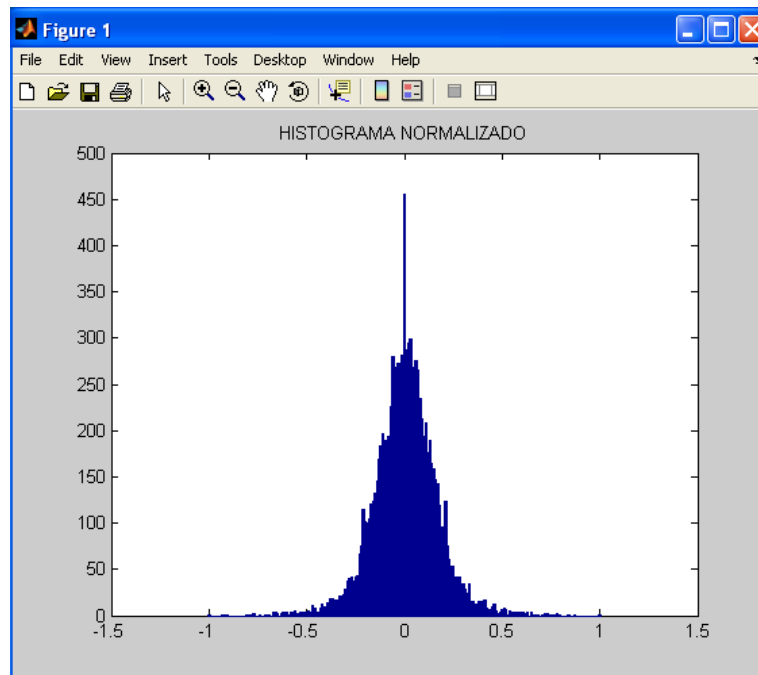


Figura 6.20. Histograma normalizado para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

1.3.2. Gráficos

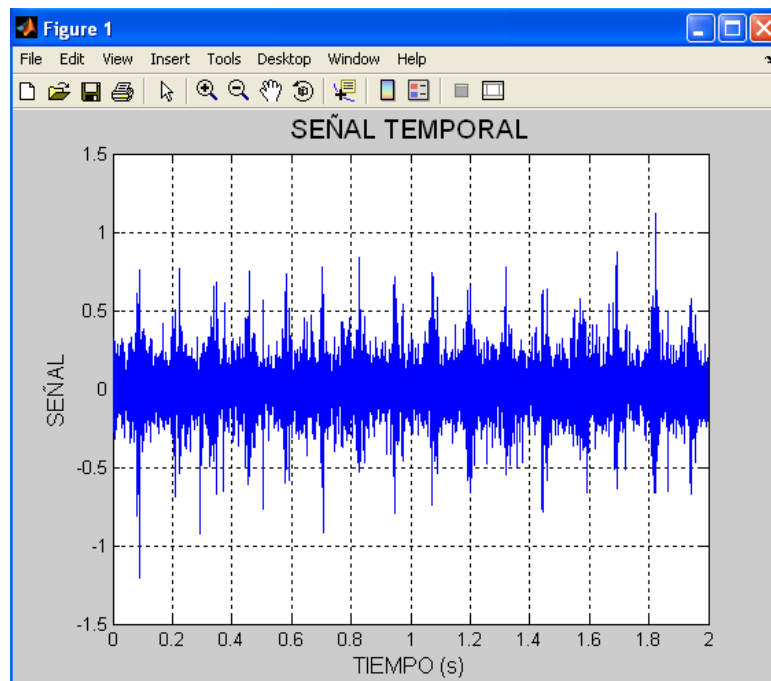


Figura 6.21. Señal temporal para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

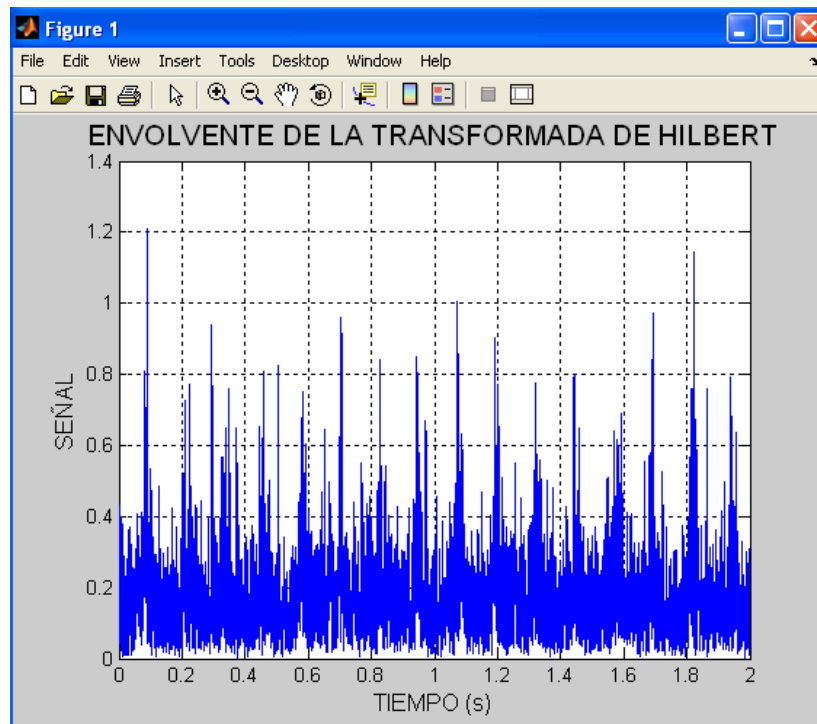


Figura 6.22 Envolvente para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

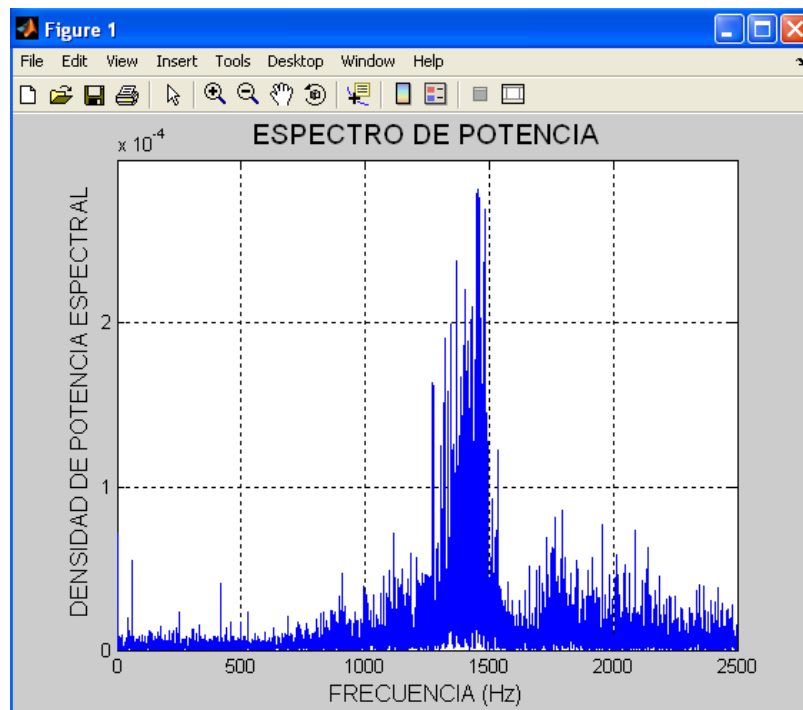


Figura 6.23. PSD para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

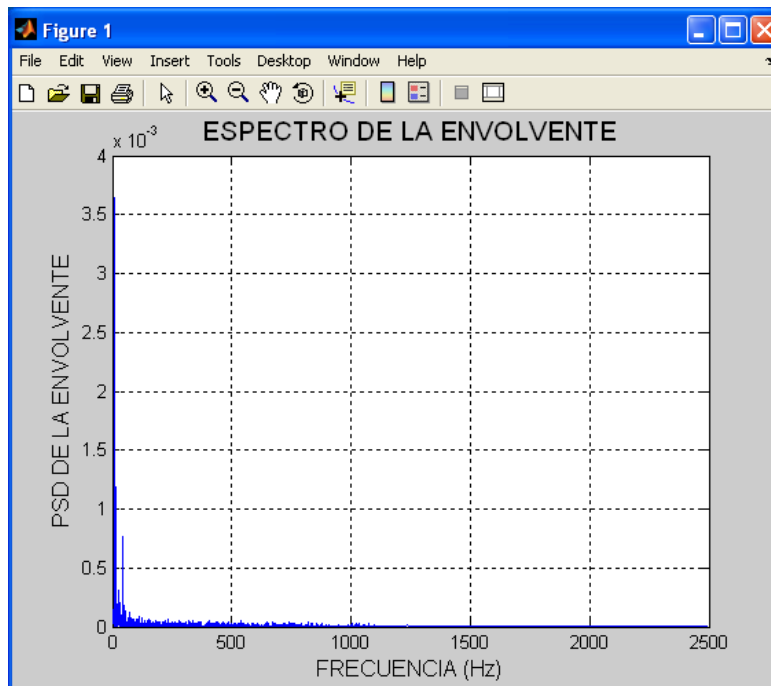


Figura 6.24. Espectro de envoltente para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

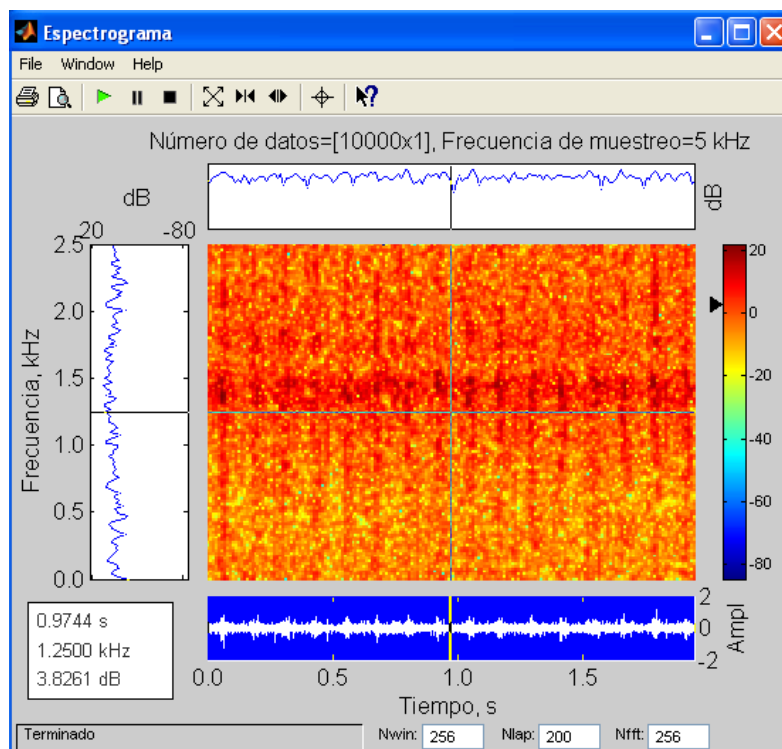


Figura 6.25. Espectrograma para un rodamiento con defecto en elemento rodante.

1.3.3. Transformada Wavelet

Para poder comparar los resultados de análisis de vibraciones de un rodamiento con defecto en anillo exterior, interior y elemento rodante, se representarán a continuación las mismas Wavelet que en los casos anteriores y con la misma escala.

DATOS A ANALIZAR

Velocidad de giro: 20 Hz.

Número de vueltas 3.

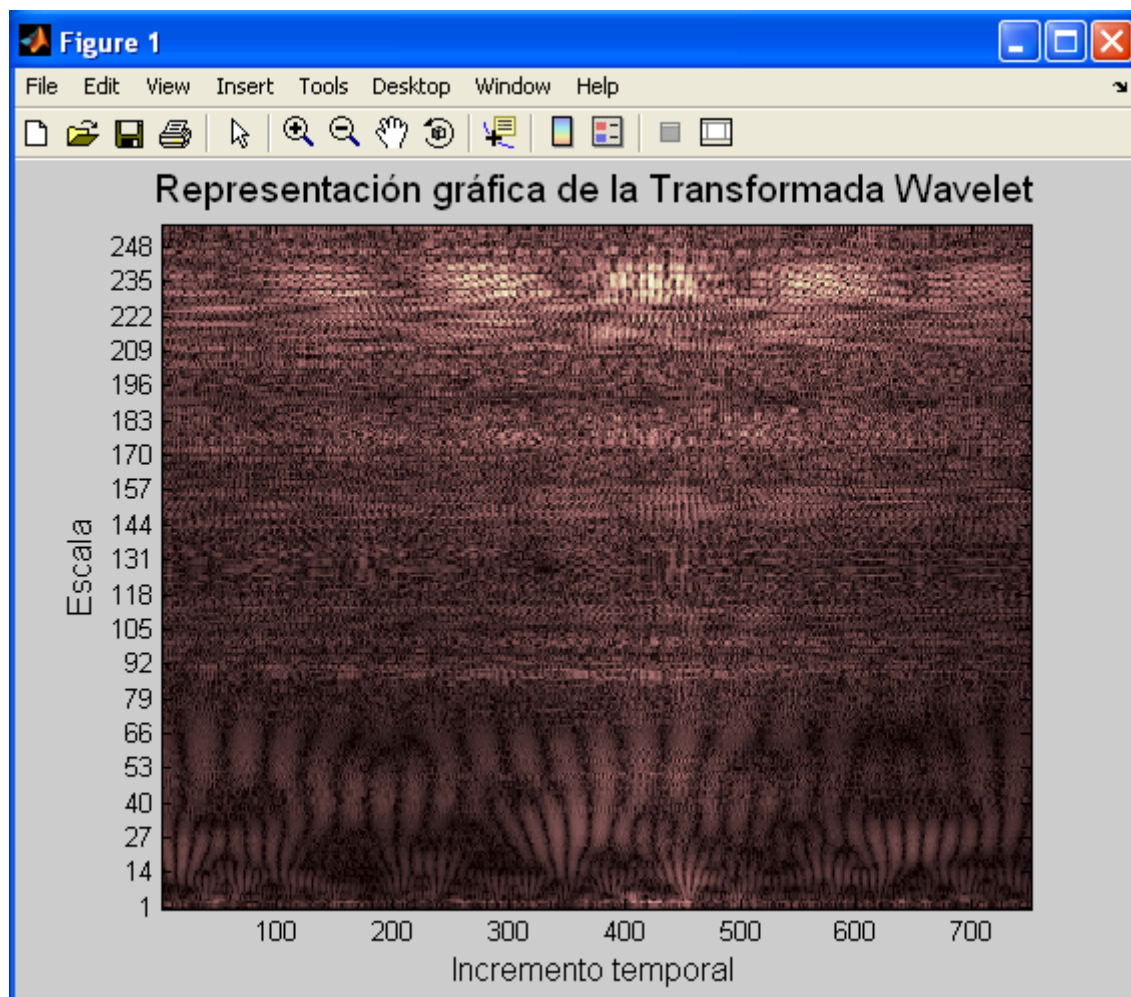


Figura 6.26. Morlet con escala 256.

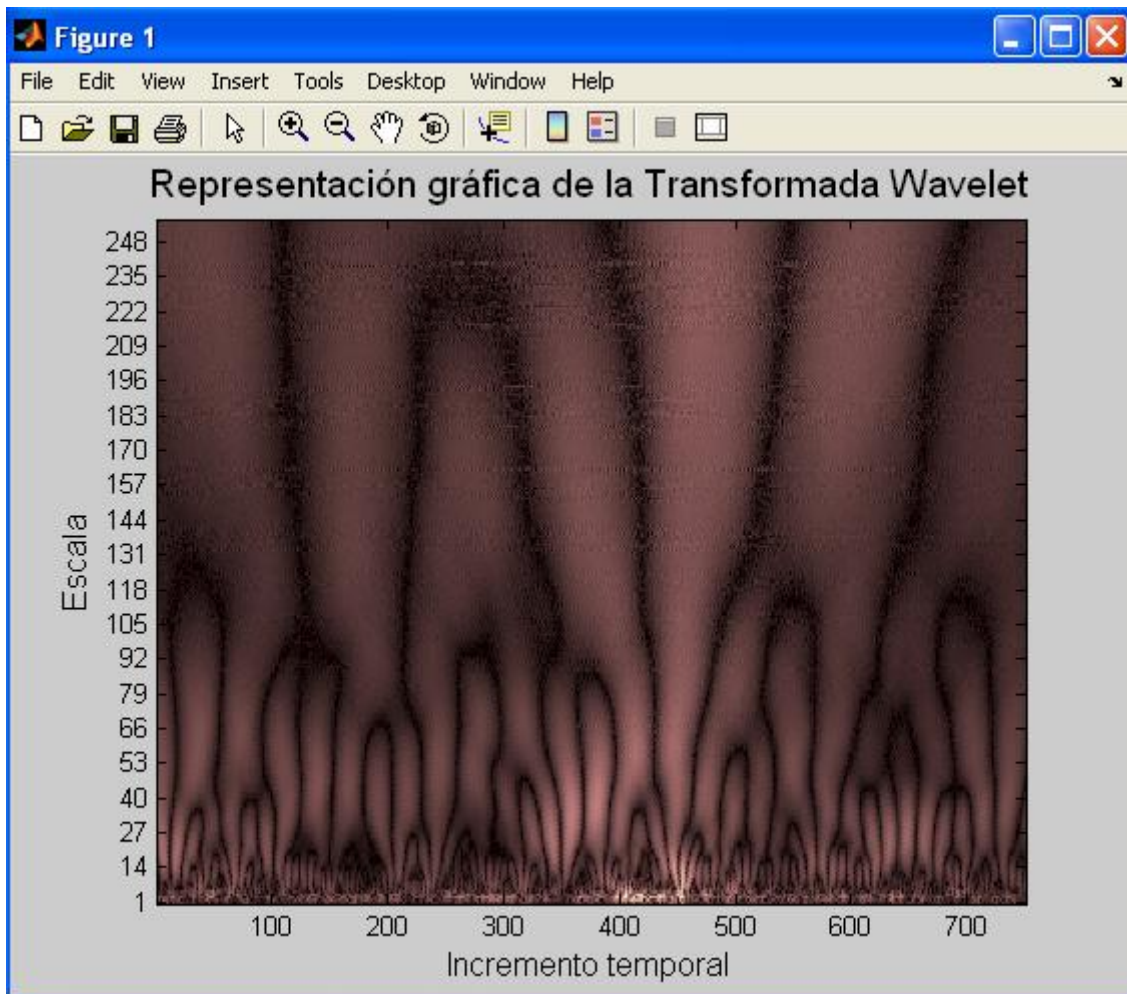


Figura 6.27. Biortogonal 6.8 con escala 256.

2. SIMULACIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS

En este apartado se realizan las gráficas correspondientes a la simulación de defectos en rodamientos, con el fin de comprobar la influencia de parámetros tales como: la zona de carga, la velocidad, el ruido, el desequilibrio o el tamaño del defecto; en cada uno de los tres tipos de defectos disponibles en la aplicación. Para ello, se hacen los siguientes juegos de pruebas:

- Para el defecto en el anillo exterior se obtienen las gráficas correspondientes a un tamaño de defecto de 1 mm a la velocidad de 1.200 rpm, una zona de carga de 0,5, ruido de 0,125 y defectos distribuidos de 0,05.
- Para el defecto en el anillo interior los parámetros utilizados son: para las zonas de carga de 0,5 a la velocidad de 1.200 rpm, un tamaño de defecto de 1 mm con ruido aleatorio de 0,125 y defectos distribuidos de 0,05.
- Para el defecto del elemento rodante se elaboran las gráficas para un tamaño de defecto de 1 mm y unas velocidades de 1.200 rpm, con una zona de carga de 0,5, ruido de 0,125 y defectos distribuidos de 0,05.

2.1. Simulación de defecto en anillo exterior

2.1.1. Resultados gráficos

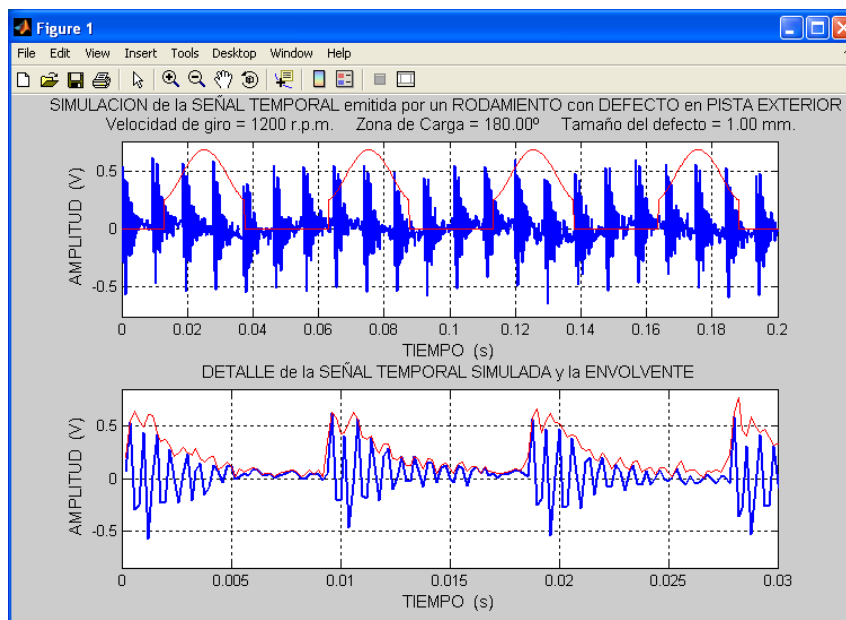


Figura 6.28. Señal temporal de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

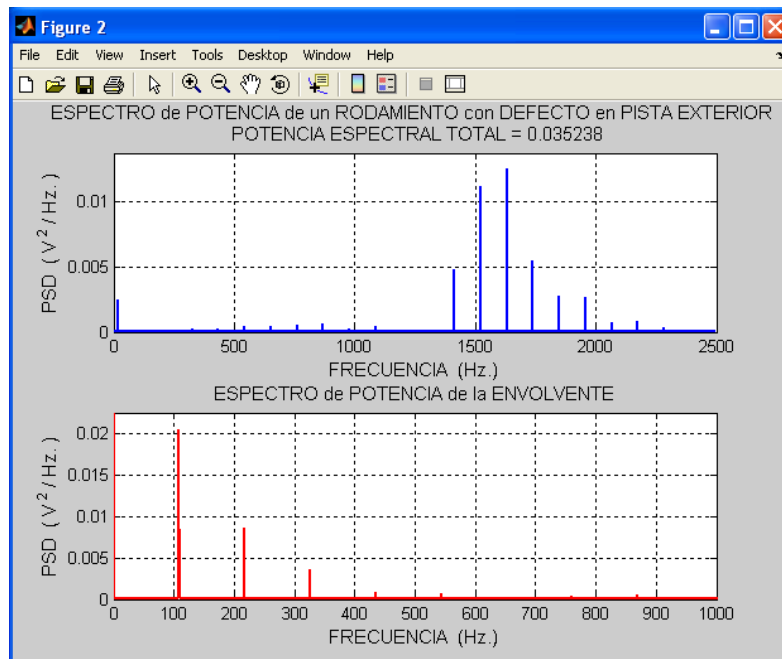


Figura 6.29. Espectro de potencia de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

2.1.2. Resultados estadísticos



Figura 6.30. Datos estadísticos de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

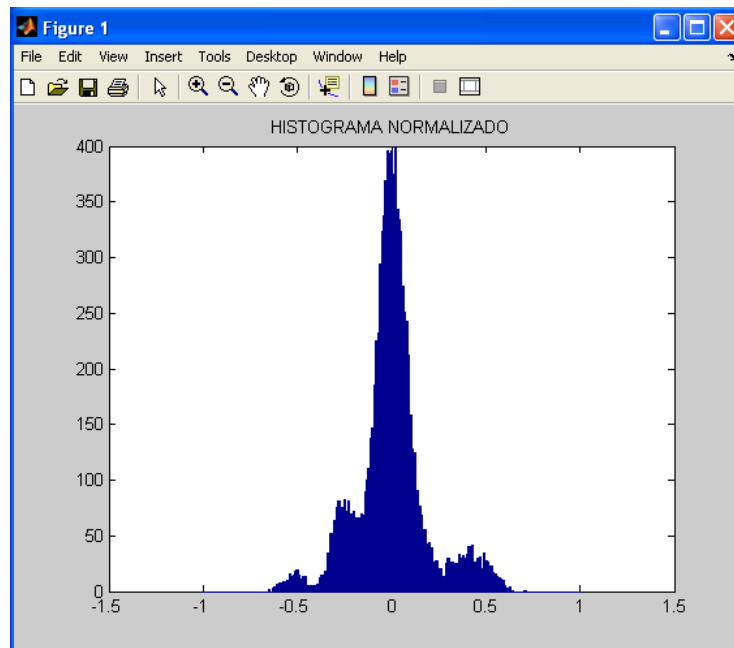


Figura 6.31. Histograma normalizado de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

2.1.3. Gráficos

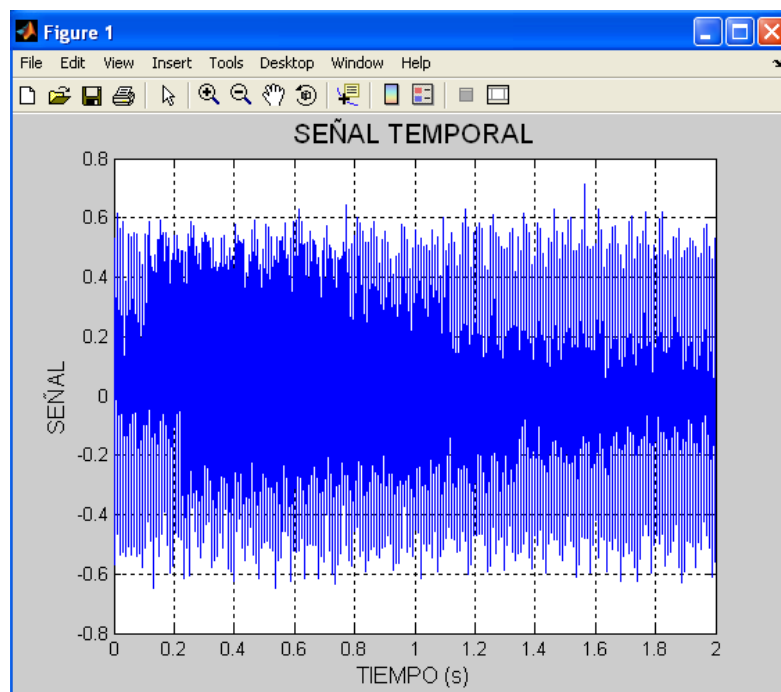


Figura 6.32. Señal temporal de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

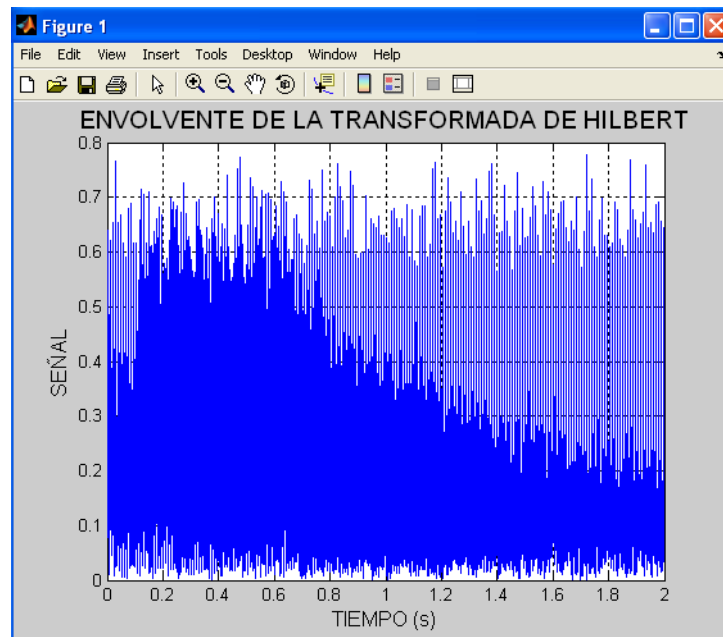


Figura 6.33. Envolvente de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

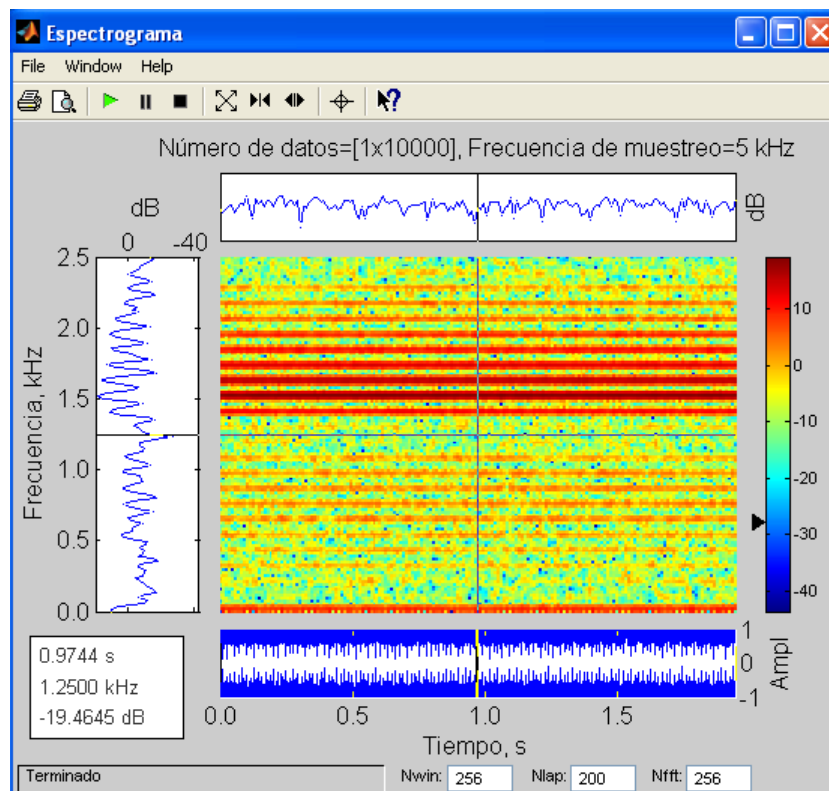


Figura 6.34. Espectrograma de un rodamiento con defecto en anillo exterior.

2.1.4. Transformada Wavelet

Se van a representar dos tipos de Wavelet madre: uno de orden único y otro de varias órdenes, con escala de 512.

DATOS A ANALIZAR

Velocidad de giro: 20 Hz.

Número de vueltas 3.

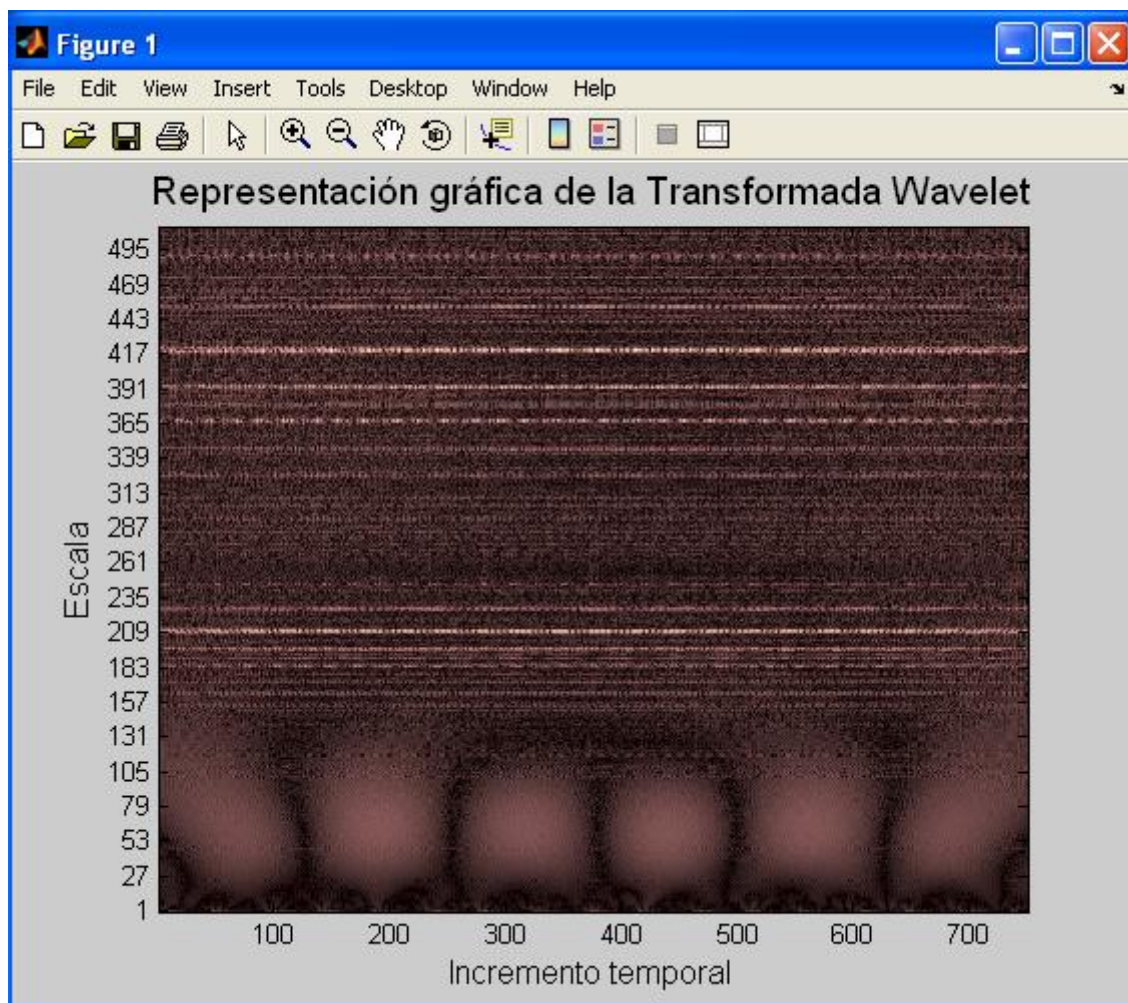


Figura 6.35. Mexican Hat.

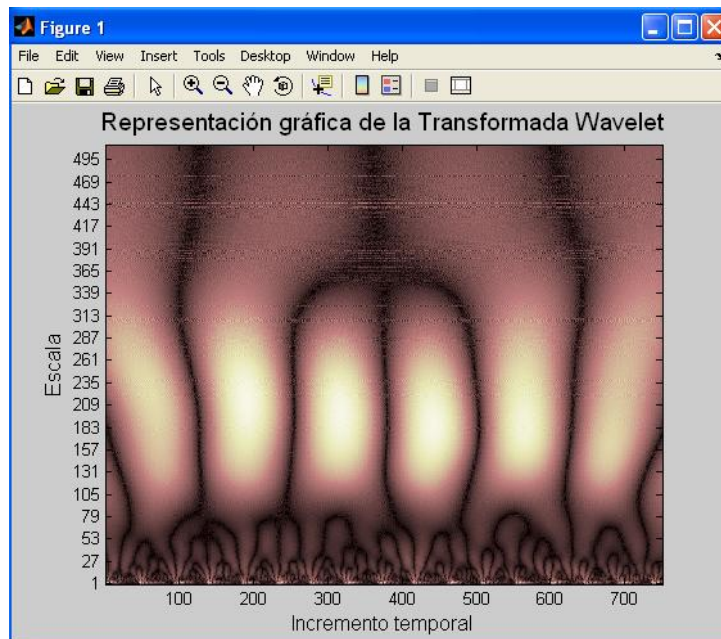


Figura 6.36. Symlet 8.

2.2. Simulación de defecto en anillo interior

2.2.1. Resultados gráficos

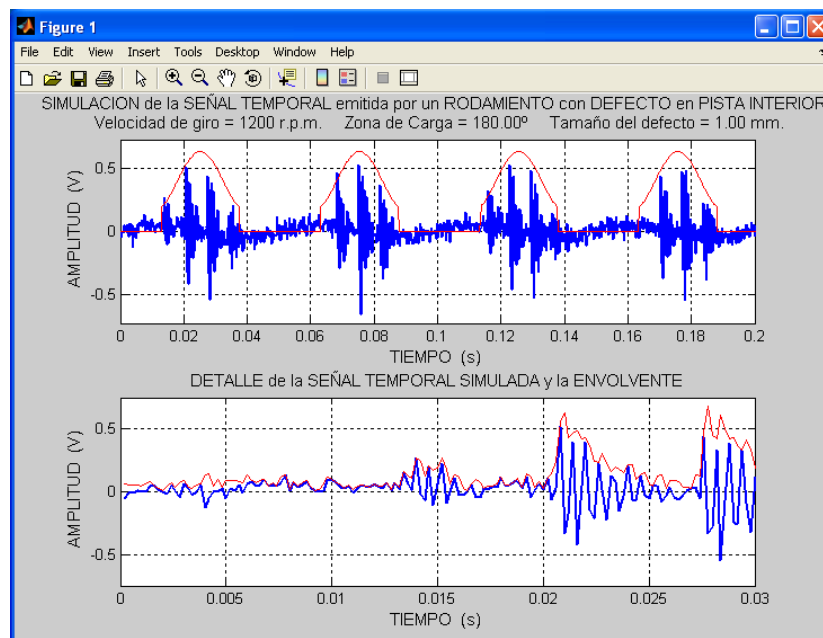


Figura 6.37. Señal temporal de un rodamiento con defecto en anillo interior.

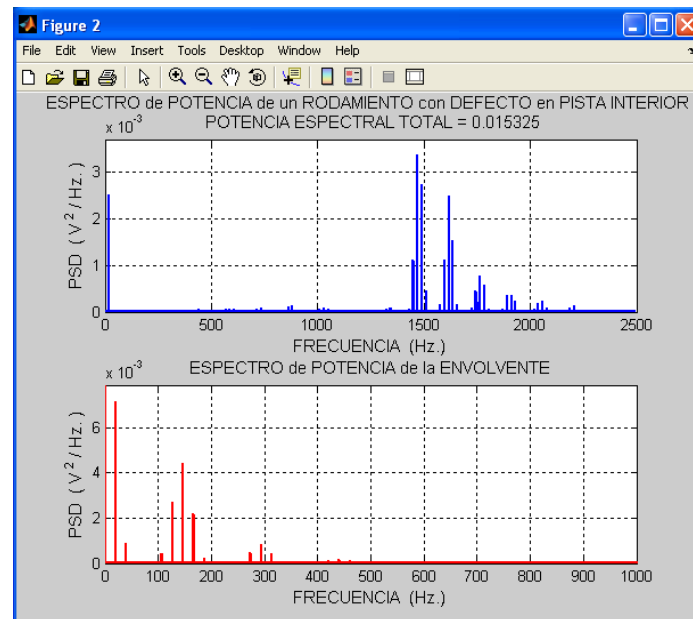


Figura 6.38. Espectro de potencia de un rodamiento con defecto en anillo interior.

2.2.2. Resultados estadísticos



Figura 6.39. Datos estadísticos de un rodamiento con defecto en anillo interior.

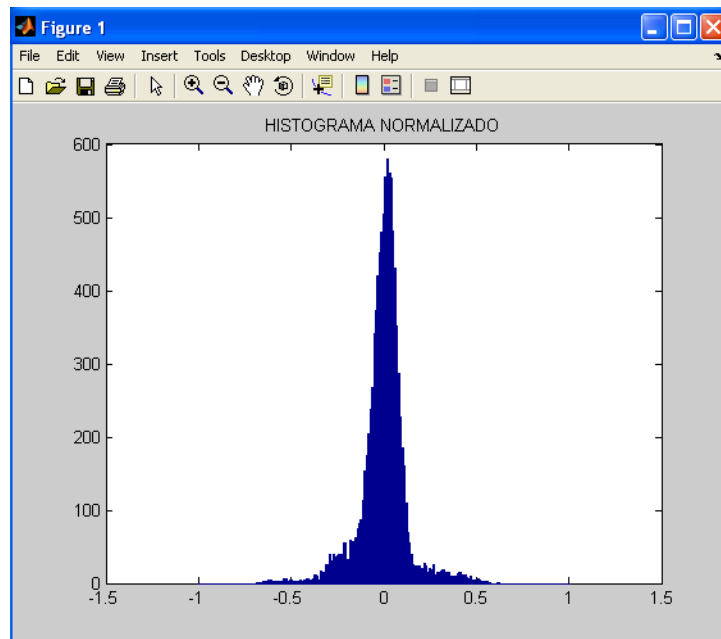


Figura 6.40. Histograma normalizado de un rodamiento con defecto en anillo interior.

2.2.3. Gráficos

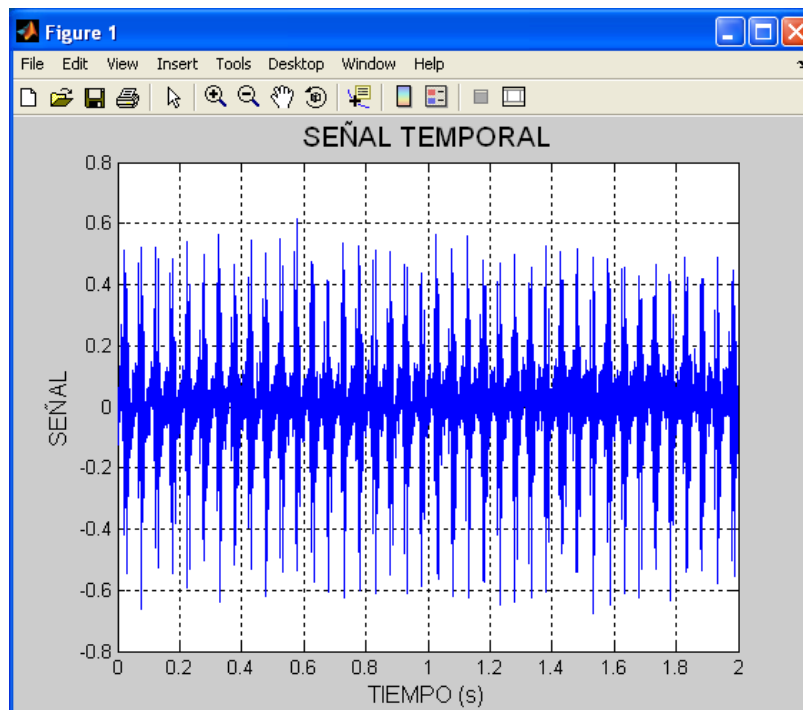


Figura 6.41. Señal temporal de un rodamiento con defecto en anillo interior.

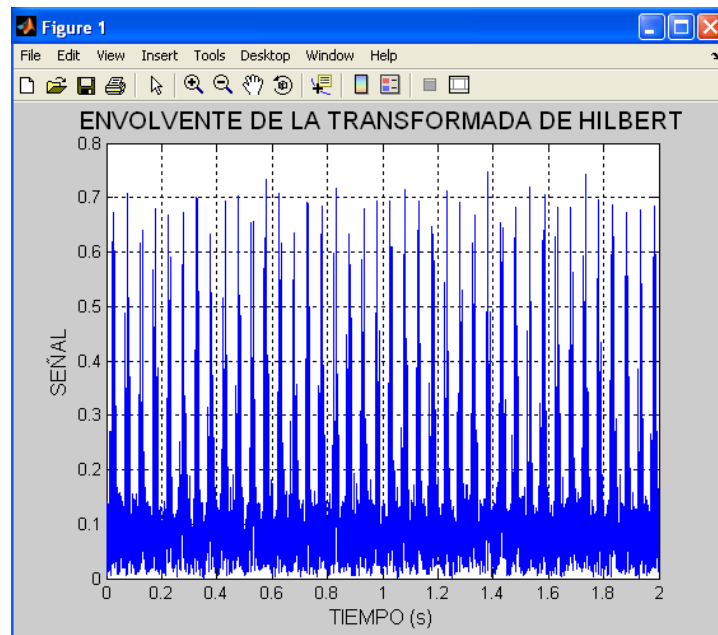


Figura 6.42. Envolvente de un rodamiento con defecto en anillo interior.

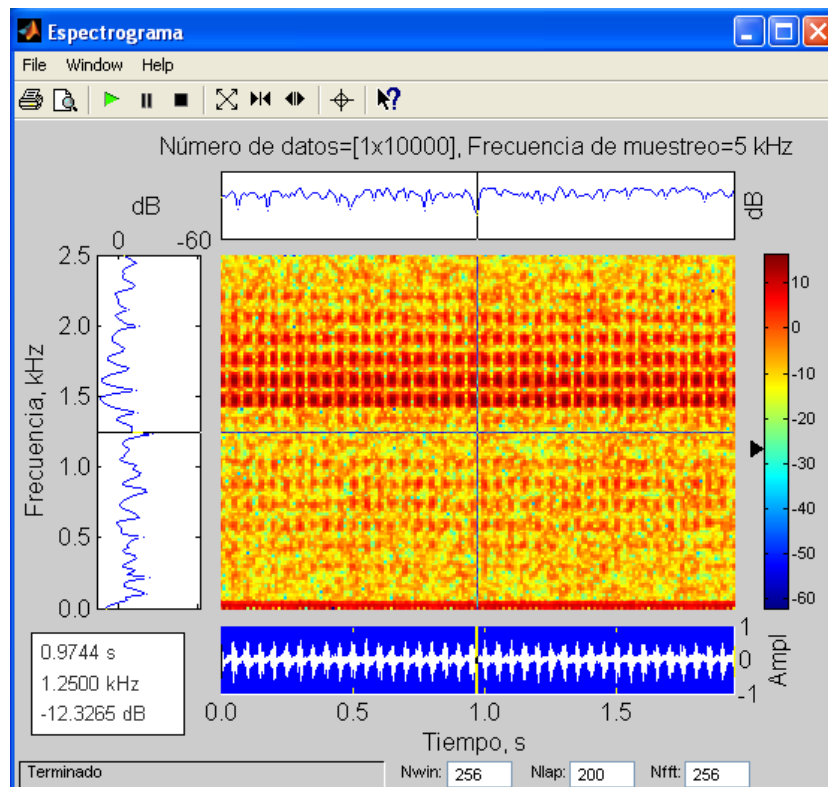


Figura 6.43. Espectrograma de un rodamiento con defecto en anillo interior.

2.2.4. Transformada Wavelet

Se van a representar dos tipos de Wavelet madre: uno de orden único y otro de varias órdenes, con escala de 512.

DATOS A ANALIZAR

Velocidad de giro: 20 Hz.

Número de vueltas 3.

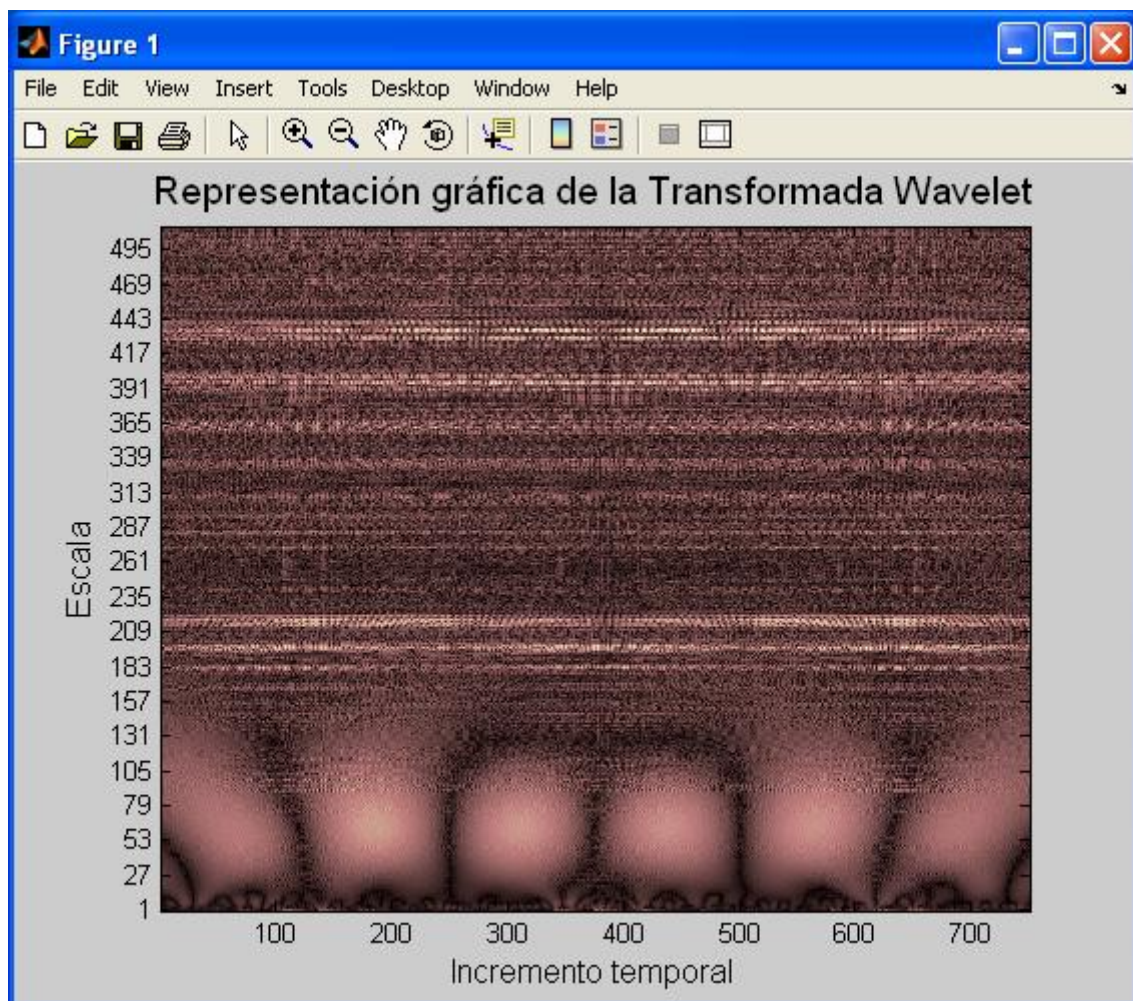


Figura 6.44. Mexican Hat.

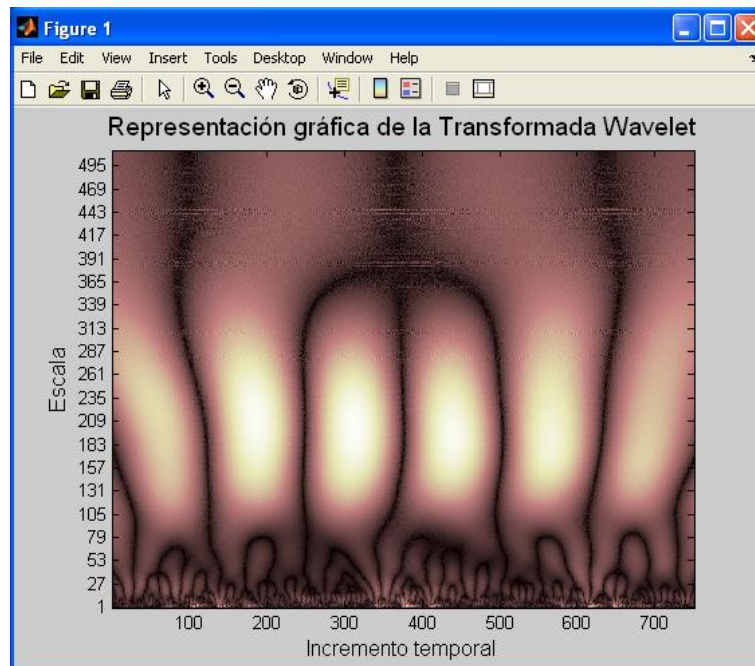


Figura 6.45. Symlet 8.

2.3. Simulación de defecto en elemento rodante

2.3.1. Resultados gráficos

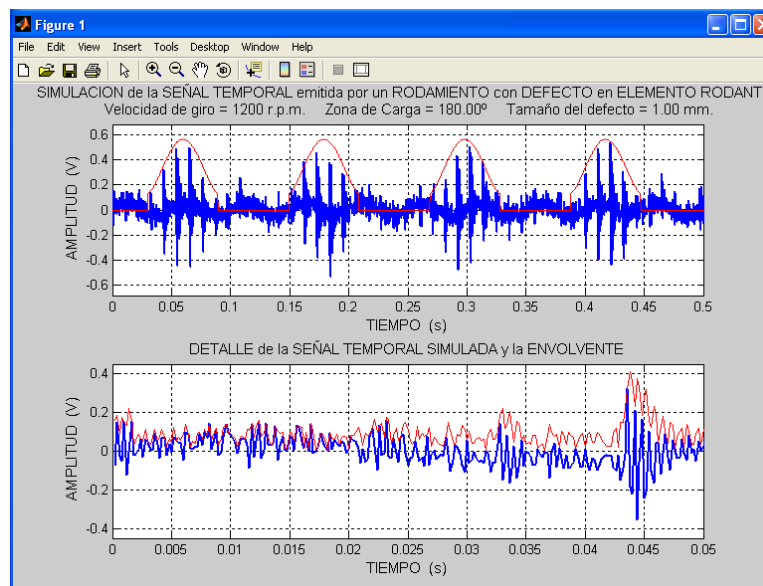


Figura 6.46. Señal temporal de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

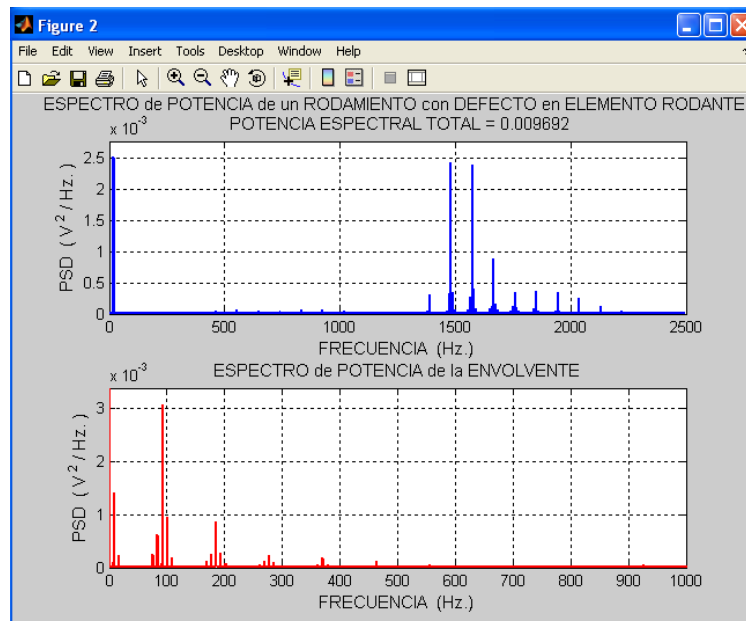


Figura 6.47. Espectro de potencia de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

2.3.2. Resultados estadísticos

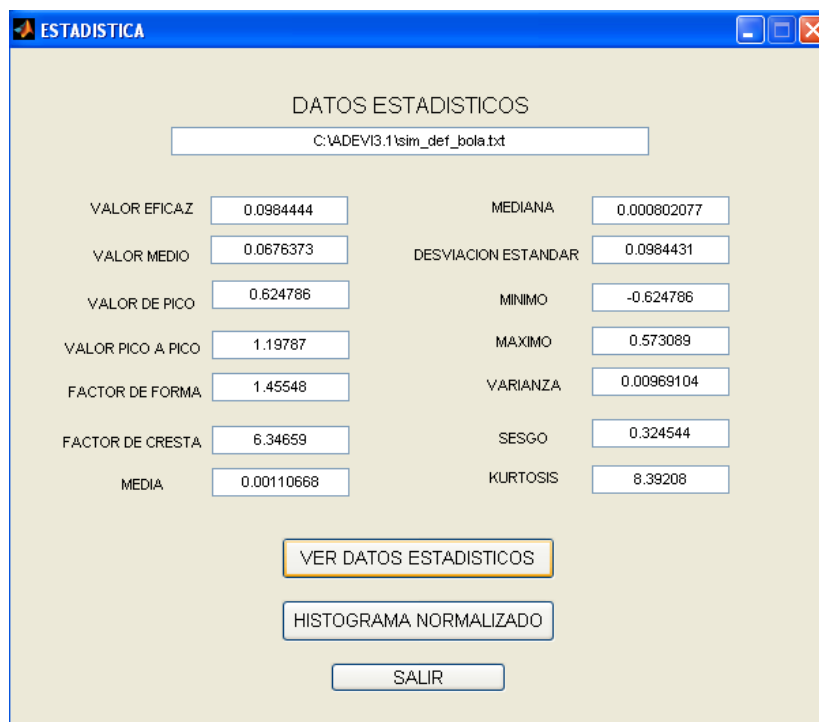


Figura 6.48. Datos estadísticos de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

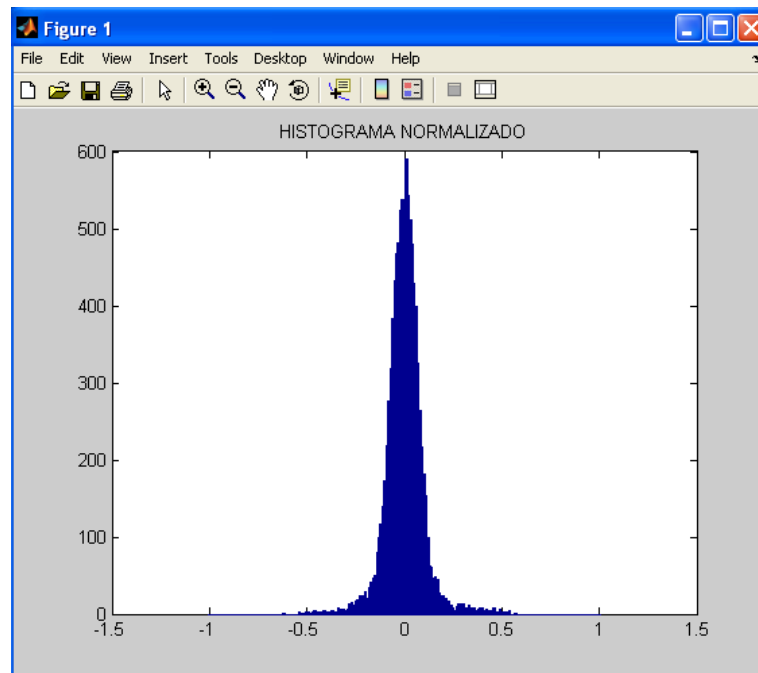


Figura 6.49. Histograma normalizado de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

2.3.3. Gráficos

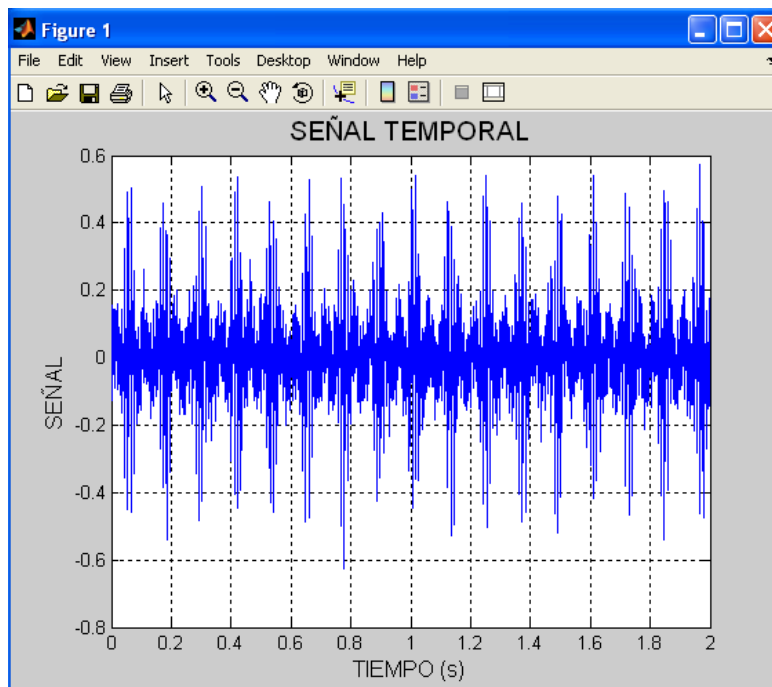


Figura 6.50. Señal temporal de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

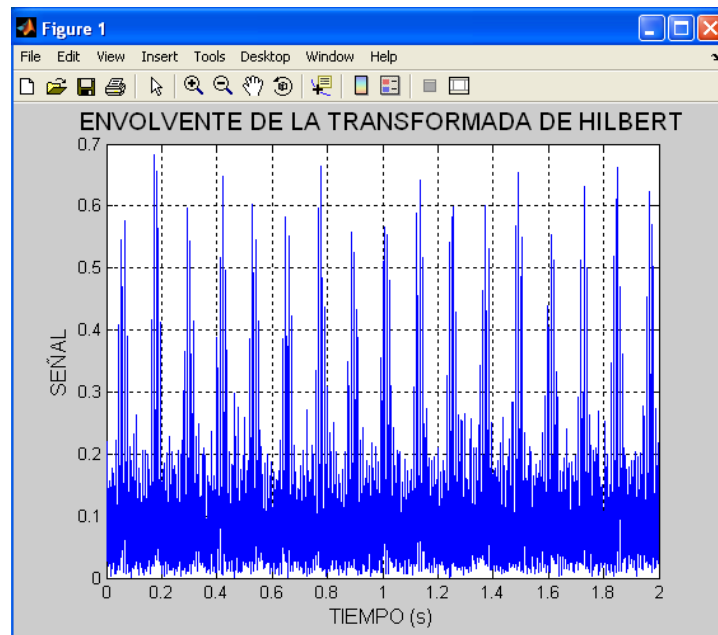


Figura 6.51. Envolvente de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

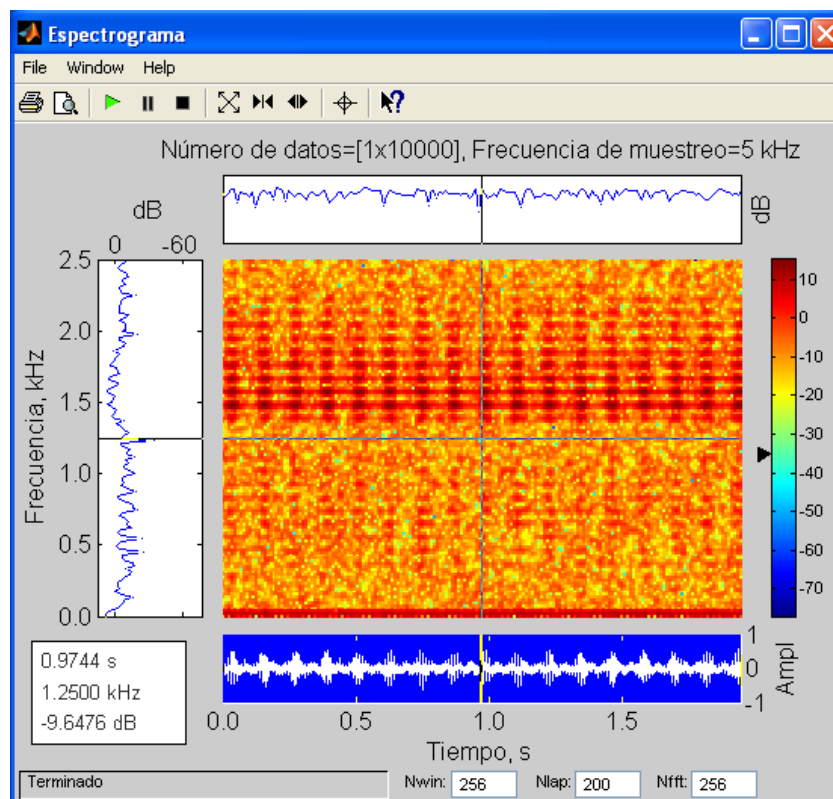


Figura 6.52. Espectrograma de un rodamiento con defecto en elemento rodante.

2.3.4. Transformada Wavelet

Se van a representar dos tipos de Wavelet madre: uno de orden único y otro de varias órdenes, con escala de 512.

DATOS A ANALIZAR

Velocidad de giro: 20 Hz.

Número de vueltas 3.

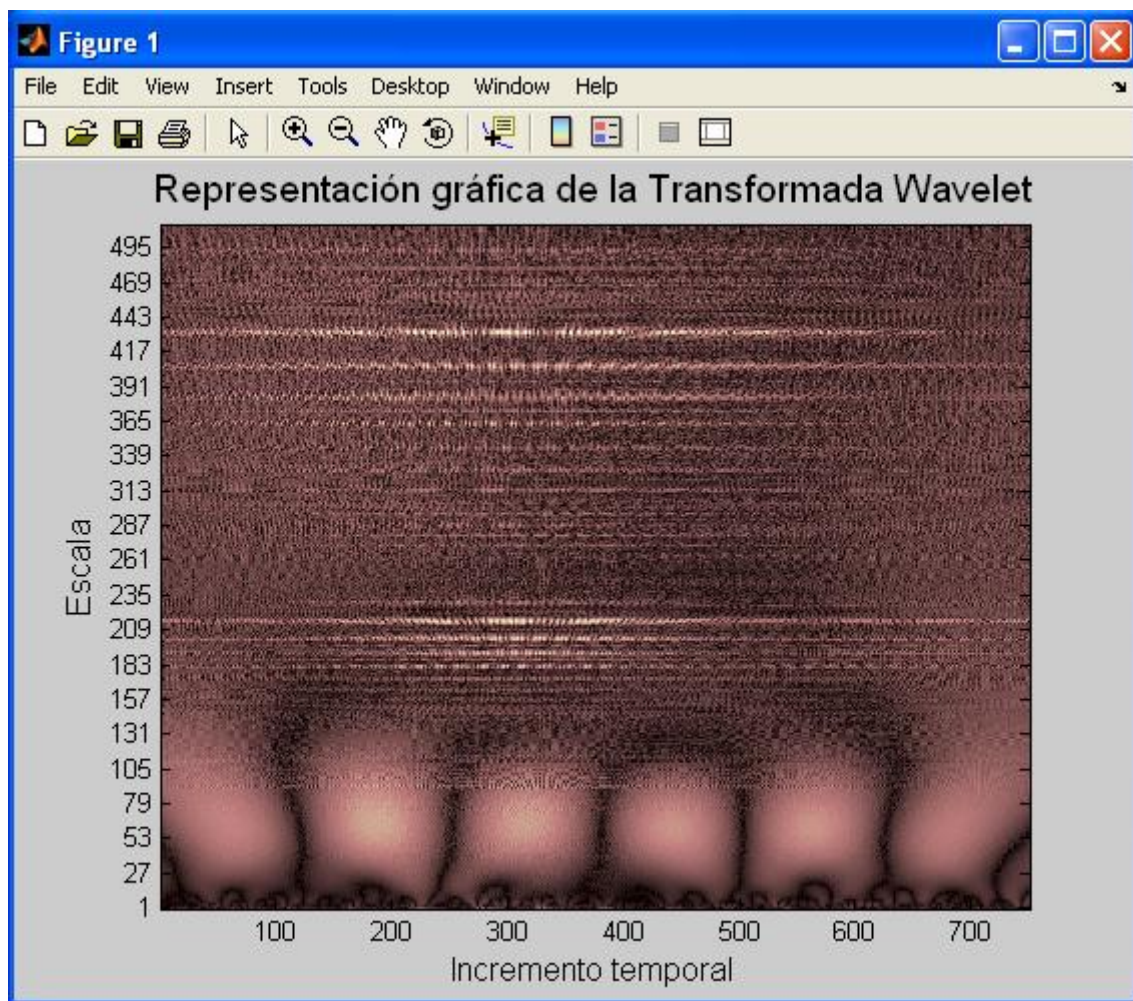


Figura 6.53. Mexican Hat.

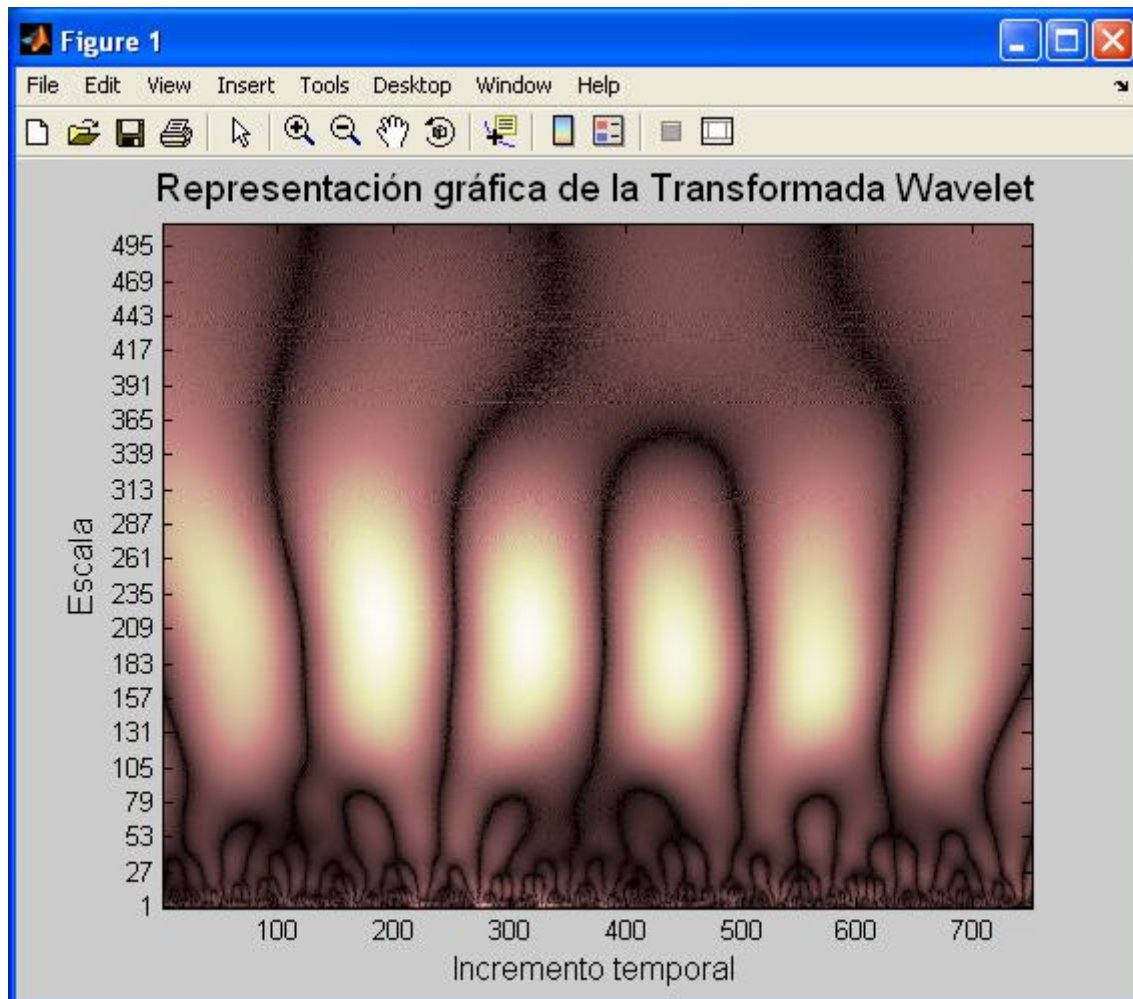


Figura 6.54. Symlet 8.

Capítulo VII:

CONCLUSIONES



VII. CONCLUSIONES

1. APORTACIONES DEL PROYECTO

Al llegar a este punto del proyecto se puede afirmar que se han cumplido con todos los objetivos propuestos al principio del mismo.

- Se ha desarrollado una aplicación informática que permite analizar vibraciones mecánicas de una manera sencilla y más rápida que la aplicación precedente; se ha introducido nuevas técnicas para este análisis, en particular, el espectro tempo-frecuencial, que la versión anterior no contemplaba
- Se ha incorporado la simulación de vibraciones de rodamientos con defecto con posibilidad de enlazar con otra pantalla para la generación de nuevos análisis.
- Otro aspecto novedoso a destacar es el estudio del análisis de la señal, tanto en el ámbito de las vibraciones como en el estadístico que ahora permite realizar ADEVI3.1.
- Asimismo, se ha integrado la parte de simulación de defectos en máquinas, específicamente de los rodamientos, que implica que se ha realizado un análisis pormenorizado de los mismos y de sus espectros característicos. Para esto, se ha efectuado un análisis profundo de los rodamientos tanto de su geometría como de su funcionamiento.
- Se ha desarrollado una programación muy compleja dentro de la versión del MATLAB 7.0 y en particular del módulo GUIDE, con lo que se han podido realizar cambios en las anteriores pantallas para integrarlas en la nueva aplicación y crear la adaptación de la versión ADEVI2.0 a ADEVI3.1. Con esto queda abierto el camino para adaptaciones posteriores que solucionen problemáticas similares en otros elementos de la máquina.
- Reseñar que la principal aportación de este proyecto es la creación de una nueva versión de la aplicación informática ADEVI3.1. Las características más importantes de la aplicación son:
 - Recopila las técnicas más utilizadas de análisis de vibraciones, así como la simulación de vibraciones por defectos en rodamientos.
 - Introduce el análisis mediante el espectro tempo-frecuencial.

- El manejo de la aplicación se simplifica tras el diseño de un interfaz intuitivo y de fácil manejo para el usuario, que presenta unos resultados gráficos con los cuales también se puede interactuar, al ser editables.
- En el caso de análisis de ficheros de datos de vibraciones, permite realizar un mismo tipo de estudio vibratorio o estadístico para diferentes señales tomadas, solo se requerirá utilizar el fichero de datos específico que contenga la señal.
- Los resultados obtenidos se representan en el mismo formato, lo que da flexibilidad a la aplicación, apariencia de sencillez y facilita su manejo.
- En el caso de simulación de vibraciones por defectos en rodamientos, se generan los resultados modificando los parámetros en una plantilla de entrada de la aplicación, combinando sencillez y rapidez, alterando los parámetros.
- Para poder hacer un estudio más completo se han incorporado parámetros tales como ruido aleatorio y defectos distribuidos.
- La aplicación permite el almacenamiento de los datos primarios y de los resultados obtenidos de una manera segura y de fácil acceso.
- Queda abierta la posibilidad de creación de nuevos enlaces para la generación de nuevos análisis.
- Se ha escrito la aplicación en inglés para que sea accesible a más usuarios.
- Se ha logrado mayor velocidad en la obtención de resultados que con la versión anterior de la aplicación, tras depurar la misma.

Reseñar que se ha comprobado que la aplicación ADEVI3.1 funciona correctamente, tras realizar distintas pruebas con los respectivos resultados como se puede apreciar en los capítulos cinco y seis.



2. NUEVAS LÍNEAS DE DESARROLLO

La verificación de la solidez y utilidad de la aplicación ADEVI3.1 animará, sin duda, a extenderla a otros campos, con las oportunas adaptaciones.

A continuación se detallan varias opciones:

- Incorporar otros tipos de defectos en los rodamientos que la propia experiencia de mantenimiento pueda ir descubriendo, se trataría de una ampliación sencilla de realizar.
- Modificar ADEVI3.1 para realizar el análisis de defectos en otros elementos como, por ejemplo, en las máquinas eléctricas y, en particular, los engranajes.
- Introducción de otras funciones matemáticas como las Wavelet madre, discretas.
- Llevar en estudio el espectrograma.
- Usar la aplicación como material didáctico bien en su conjunto, o partes de ellas que pueden combinar tanto la explicación de temas de ingeniería mecánica, como la aplicación estadística e informática. Especialmente se podrían establecer seminarios sobre parte de ADEVI3.1 y también sobre el conjunto.
- Como herramienta docente que suple algunas materias.

Si se realizaran las sugerencias de la ampliación de esta aplicación se conseguiría convertir esta aplicación en una herramienta importante para el estudio completo de vibraciones, rodamientos y engranajes.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] BRAUN, S.G., EWINS, D.J. and RAO, S.S. *Encyclopedia of Vibration*. Academid Press Inc. Londres. 2001.
- [2] CASASOLA, G. *Multianálisis frecuencial y estadístico de la vibración emitida por un elemento mecánico con fallo bajo diferentes estados de carga*. Proyecto fin de carrera Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. 2002.
- [3] CHUI, C. K. *An introduction to wavelets*. Academic Press. 1992.
- [4] COHEN, A. *Wavelets and multiscale signals processing*. Chapman and Hall. 1995.
- [5] CORRALES FERNANDEZ, E. *Aplicación informática para el análisis y simulación de señales vibratorias generadas por elementos*. Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. 2003.
- [6] ESTUPIÑAN, E. y SAAVEDRA, P. *Técnicas Modernas en el Análisis de Vibraciones de Rodamientos*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Madrid. 2000.
- [7] FRAGA LÓPEZ, P. *Vibraciones mecánicas. Diagnósticos de averías*. Universidade da Coruña. La Coruña. 1999.
- [8] GARCÍA GÓMEZ, C. *Evaluación de un elemento mecánico mediante técnicas modernas de análisis de la señal de vibración: Aplicación a rodamientos*. Proyecto Fin de Carrera Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. 2002.
- [9] GARCIA PRADA, J. C.; RUBIO ALONSO, H.; ISASI SANCHEZ, L. y LORCA HERNANDO, P. J. *Determinación de la zona de carga de un rodamiento a partir de la señal temporal de vibración*. V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Venezuela. 2001.
- [10] GÓMEZ, A.; IÑIGUEZ, A. *Técnicas de Procesado de Señal para el Análisis de Vibraciones en Rodamientos. Aplicación a Control de Calidad*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Madrid. 2000.
- [11] HP. *The fundamentals of signal analysis*. Application Note 243. Hewlett Packard.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [12] HP. *Effective Machinery Measurements using Dynamic Signal Analyzers*. Application Note 243-1. Hewlett Packard.
- [13] KAHANE, J. P; LEMARIÉ, P. G. *Fourier series and wavelets*. Gordon and research Publishers, studies in Development of modern mathematics. 1995.
- [14] MALLAT, S. *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press. 1998.
- [15] ORTEGA, L. A.; LEZÁUN MARTÍNEZ DE UBAGO, L.; ABAD BLASCO, J.; MARTÍNEZ GÓMEZ, F. J. y GARCÍA GARCÉS, M. *Análisis de Fallos en Rodamientos por el Método de la Envolvente*. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica. Madrid. 2000.
- [16] PASAMONTES GARCÍA, M. *La Transformada Wavelet en el análisis de señales. Aplicación a vibraciones en sistemas rotativos*. Proyecto Fin de Carrera Escuela Politécnica Superior. Universidad Carlos III de Madrid. 2005.
- [17] PEÑA, D. S. R. *Estadística. Modelos y métodos*. Tomo 1: Fundamentos. 2ª Edición Revisada. Alianza Editorial. 1995.
- [18] RUBIO ALONSO, H. *Caracterización de defectos localizados en sistemas mecánicos rotativos mediante análisis de vibraciones*. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. 2003.
- [19] SÁNCHEZ MARTÍN, A. *Aplicación de técnicas de análisis de vibración en la diagnosis del grado de defecto de un elemento mecánico*. Proyecto fin de carrera Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. 2001.
- [20] SKF. *Catálogo general de rodamientos*. SKF, 1997.
- [21] SMITH, C. Collins Diccionario español-inglés. Editorial Grijalbo. 1984.
- [22] VIDAL CASTAÑEDA, A. *Desarrollo de una aplicación informática para el análisis y simulación de señales mecánicas*. Proyecto fin de carrera Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III de Madrid. 2005.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

DIRECCIONES DE INTERNET:

Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero. ETSII. Universidad Politécnica de Madrid.

<http://mat21.etsii.upm.es/ayudainf/aprendainf/Matlab70/matlab70primero.pdf>

Conceptos generales de vibraciones mecánicas.

<http://cguerra.fime.uanl.mx/articles/mechvibration/cap01.pdf>

Diccionario técnico español-inglés.

<http://www.sapiensman.com/ESDictionary/>

Diferentes tipos de vibraciones mecánicas.

<http://www.monografias.com/trabajos/vibramec/vibramec.shtml>

Espectrograma.

http://personal.telefonica.terra.es/web/sixsancal/documentacion/Pdf%20por%20partes/3-2_El%20espectrograma.pdf

Manual GUIDE.

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=12122&objectType=FILE>

Spectrogram.

http://cvsp.cs.ntua.gr/courses/patrec/OnlineSpeechDemos/speechDemo_2004_Part1.html

Tipos de mantenimiento en vibraciones mecánicas.

<http://www.solomantenimiento.com/articulos/vibraciones-mecanicas.htm>

Vibraciones y ruido en máquinas y mecanismos, defectología. EPS. Universidad Carlos III de Madrid.

<http://www.uc3m.com.es/uc3m/dpto/IN/dpin11/S2AM3/INVESTIGACION/defectologia/vibra.htm>

